

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MATEUS MONTANDON LIMA

**CONCRETO CONVENCIONAL COM AREIA PET: ESTUDO DE PROPRIEDADES
MECÂNICAS E FÍSICAS**

**Alegrete
2019**

MATEUS MONTANDON LIMA

**CONCRETO CONVENCIONAL COM AREIA PET: ESTUDO DE PROPRIEDADES
MECÂNICAS E FÍSICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Simone Dornelles Venquiaruto

Coorientador: Aldo Leonel Temp

**Alegrete
2019**

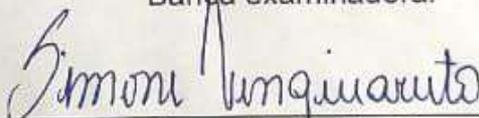
MATEUS MONTANDON LIMA

CONCRETO CONVENCIONAL COM AREIA PET: ESTUDO DE PROPRIEDADES
MECÂNICAS E FÍSICAS

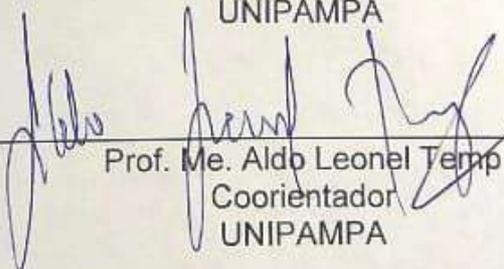
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 29 de novembro de 2019.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Simone Domelles Venquiaruto
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Me. Aldo Leonel Temp
Coorientador
UNIPAMPA



Prof. Me. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira
UNIPAMPA



Prof. Dr. Fladimir Fernandes dos Santos
UNIPAMPA

Dedico este trabalho a minha orientadora
Prof. Dra. Simone Dornelles Venquiaruto

AGRADECIMENTO

Agradeço em primeiro lugar à minha orientadora Prof. Dr. Simone Dornelles Venquiaruto pelas orientações, incentivo, paciência e por nunca deixar eu desistir;

Agradeço ao meu Coorientador Prof. Me. Aldo Leonel Temp pelas orientações e incentivos;

Agradeço aos Professores Dr. Fladimir Fernandes dos Santos e Me. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira pelo incentivo e preocupações sobre o decorrer do trabalho;

Agradeço aos meus amigos que não me deixaram desistir, em especial Mariana, Tácia, Andressa Lorraine;

Aos demais professores, que no decorrer do trabalho me auxiliaram de alguma forma;

Aos técnicos de laboratório e voluntários que me auxiliaram durante os ensaios e as dúvidas que me tiraram;

À UNIPAMPA por me proporcionar a infraestrutura e conhecimento para que pudesse concluir meu trabalho;

Agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram para o desenvolvimento dessa pesquisa;

Meu muito obrigado!

“O homem que não cultiva o hábito de pensar desperdiça um dos maiores prazeres da vida e não consegue aproveitar o máximo de si”.

Thomas Edison

RESUMO

Atualmente uma das grandes preocupações é a conservação de recursos naturais e o descarte ambientalmente adequado para bens de consumo que não são mais utilizados. O plástico é um dos materiais mais utilizados em todo o mundo devido a sua variedade de cores e possibilidade de se moldar a diversas formas, ele é utilizado principalmente na embalagem de produtos. O aumento do consumo de garrafas Politereftalato de Etileno (PET) tem gerado um problema ambiental, principalmente devido ao seu descarte inadequado e ao seu elevado tempo de decomposição. O ramo da construção civil tem realizado estudos com incorporações de materiais descartáveis em matrizes de cimento Portland com o intuito de melhorar suas propriedades, destinar um fim sustentável para produtos descartados e reduzir o consumo de agregados, preservando as reservas naturais. O presente trabalho visa analisar a viabilidade de substituição parcial do agregado miúdo natural por agregado de PET em concretos convencionais. Foram avaliadas algumas propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e sua dureza superficial) e algumas propriedades físicas, (condutividade térmica e velocidade de propagação de onda ultrassônica). A substituição do agregado miúdo (areia natural) por areia de PET foi realizada em volume nos teores de 10%, 15% e 30%. Também foi executado um traço com 0% de PET para ser usado como referência. Nos testes realizados, concluiu-se que a resistência à compressão axial e a dureza superficial apresentaram perda de eficiência com o aumento da porcentagem de PET nos concretos. A condutividade térmica e a velocidade de propagação de onda ultrassônica apresentaram resultados satisfatórios. Através dos valores obtidos, conclui-se que concretos com até 30% de PET tem potencial para serem utilizados em divisórias de concreto e os concretos com teores de até 10% de PET tem resistência suficiente para serem utilizados como concreto estrutural.

Palavras-Chave: Politereftalato de etileno; PET; resistência à compressão axial; condutividade térmica.

ABSTRACT

One of the major concerns today is the conservation of natural resources and the environmentally sound disposal of unused consumer goods. Plastic is one of the most widely used materials in the world due to its variety of colors and the ability to be molded to various shapes, it is mainly used in product packaging. Increased consumption of Polyethylene Terephthalate (PET) bottles has generated an environmental problem, mainly due to their improper disposal and long decomposition time. The construction industry has been conducting studies with incorporation of disposable materials in Portland cement matrices in order to improve their properties, destine a sustainable end to waste products and reduce aggregate consumption, preserving nature reserves. The present work aims to analyze the viability of partial replacement of natural fine aggregate by PET aggregate in conventional concretes. Some mechanical properties (axial compressive strength and surface hardness) and some physical properties (thermal conductivity and ultrasonic wave propagation velocity) were evaluated. Replacement of fine aggregate (natural sand) by PET sand was carried out by volume at 10%, 15% and 30%. A 0% PET trace was also performed to be used as a reference. In the tests performed, it was concluded that the axial compression strength and surface hardness showed loss of efficiency with the increase of PET percentage in the concretes. The thermal conductivity and the ultrasonic wave propagation velocity presented satisfactory results. From the obtained values, it can be concluded that concretes with up to 30% of PET have potential to be used in concrete partitions and concretes with up to 10% of PET have sufficient strength to be used as structural concrete.

Keywords: Ethylene Polyerephthalate; PET; axial compressive strength; thermal conductivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Parede de garrafa PET unida com mistura de cal e cimento	18
Figura 2 – Parede de garrafa PET unida com mistura de cal e cimento	19
Figura 3 – Detalhe da união das garrafas PET para base de parede	19
Figura 4 – Diferentes formas da matéria-prima reciclada: fardos (garrafa) na esquerda e em flocos na direita	21
Figura 5 – Telhas feita com PET reciclado.....	22
Figura 6 – Blocos de concreto vazado com resíduos de PET	22
Figura 8 – Fluxograma do programa experimental.....	29
Figura 9 – Areia de PET	32
Figura 10 – Rompimento do corpo de prova	35
Figura 11 – Corpos de prova (CP's).....	35
Figura 12 – Materiais para esclerometria: 1) Bigorna; 2) Disco de desgaste; 3) Esclerômetro de reflexão.....	36
Figura 13 – Marcação das leituras do índice esclerométrico no CP.....	37
Figura 14 – LaserComp F305.....	39
Figura 15 – Materiais utilizados no ultrassom: 1) Cilindro de alumínio; 2) Aparelho PUNDIT; 3) Vaselina; 4) Transdutores (emissor e receptor); 5) CP	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exigências físicas, mecânicas e químicas do cimento Portland CPIV - 32	
.....	30
Tabela 2 – Massa unitária e específica do agregado miúdo natural	31
Tabela 3 – Massa unitária e específica do agregado de graúdo	33
Tabela 4 – Traços estudados e seus quantitativos de materiais	34
Tabela 5 – Resultado da resistência à compressão axial dos CP's	41
Tabela 6 – Análise de variância ANOVA da resistência à compressão axial	43
Tabela 7 – Resultado significativos e não significativos do teste de Duncan	46
Tabela 8 – Índices esclerométricos	48
Tabela 9 – Resistência à compressão superficial e à compressão axial.....	48
Tabela 10 – Condutividade térmica	49
Tabela 11 – Propriedades térmicas de materiais	50
Tabela 12 – Análise de variância ANOVA da condutividade térmica	51
Tabela 13 – Velocidades de propagação da onda ultrassônica (m/s)	52
Tabela 14 – Resistência através do IE e VU	53
Tabela 15 – Síntese dos resultados	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

PET – Politeftalato de Etileno

PUNDIT – Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Tester

UCT – Ultrasonic Concrete Tester

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

CP's – Corpos de Prova

CP IV 32 – Cimento Portland Pozolânico

MPa – Mega Pascal

kHz – Kilohertz

IE – Índice esclerométrico

Kg/m³ – Kilograma por metro cúbico

g/cm³ – gramas por centímetros cúbico

SUMÁRIO

SUMÁRIO	12
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	15
1.3 Estrutura do trabalho.....	15
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Reaproveitamento do PET.....	17
2.2 Reciclagem do PET	19
2.3 Concretos e argamassas com adição de PET	23
2.4 Revisão das propriedades mecânicas e físicas	25
2.4.1 Resistência à Compressão Axial	25
2.4.2 Avaliação da dureza superficial	25
2.4.3 Propriedades Térmicas.....	26
2.4.4 Velocidade de propagação de onda ultrassônica.....	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Programa experimental	28
3.2 Caracterização dos materiais	29
3.2.1 Cimento Portland.....	30
3.2.2 Agregado Miúdo Natural.....	30
3.2.3 Agregado Miúdo Reciclado	31
3.2.4 Agregado Graúdo	33
3.3 Definição dos traços.....	34
3.3.1 Moldagens dos concretos.....	34
3.4 Ensaio de mecânicos.....	34
3.4.1 Ensaio de resistência à compressão axial	35

3.4.2 Ensaio de esclerometria de reflexão.....	36
3.5 Ensaio de físicos	38
3.5.1 Ensaio de condutividade térmica	38
3.5.2 Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica	39
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	41
4.1 Avaliação da resistência à compressão axial	41
4.2 Avaliação da dureza superficial	47
4.3 Avaliação da condutividade térmica	49
4.4 Ensaio de propagação de onda ultrassônica.....	52
4.5 Síntese dos resultados	54
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	56
REFERÊNCIAS.....	57
APÊNDICE A – GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO NATURAL.....	63
APÊNDICE B – GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO DE PET	64
APÊNDICE C – GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO	65
APÊNDICE D – RESULTADO DOS VALORES DO TESTE DE DUNCAN.....	66

1 INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é o material mais consumido no mundo, depois da água. Devido as suas propriedades, como resistência à compressão, baixa permeabilidade, capacidade de produzir peças em diversas geometrias e a possibilidade de se combinar à outros materiais, a fim de melhorar outras propriedades como resistência a tração e ao cisalhamento, justificam as razões para esse consumo (BUEST; SILVA; CAMPITELI, 2005).

No Brasil, houve um crescimento no setor da construção civil, nos últimos anos. No período de 2005 à 2012, quando o consumo de cimento Portland aumentou em 80%, o concreto produzido por concreteiras aumentou em 180% (ABCP, 2013). De acordo com Buest et al. (2005), pelo menos três quartos do volume do concreto são ocupados pelos agregados, tendo, conseqüentemente, um aumento maior que o cimento Portland.

No intuito de melhorar as propriedades do concreto e de preservar o meio ambiente, surgem novas pesquisas sobre a inclusão de novos materiais ao concreto. Com o objetivo de reduzir o consumo dos recursos naturais e utilizar materiais ecologicamente corretos, surgiu a ideia de substituir a areia natural por materiais poliméricos, principalmente os polímeros *commodites* (polímeros utilizados como matéria prima), que apresentam maior demanda de produção e consumo pela sociedade (CORREA, 2015).

Devido à grande produção de garrafas de politereftalato de etileno (PET), onde sua destinação final, muitas vezes, não é a reciclagem, teve-se a ideia de utilizar esse material como substituição para o agregado natural, a fim de dar uma destinação final ambientalmente adequada para este resíduo e, ao mesmo tempo, preservar os recursos naturais.

O tema não é inovador, pois alguns pesquisadores, citados nesse trabalho, já desenvolveram trabalhos semelhantes em concretos e argamassas. Porém, novos estudos são relevantes, não só para validar os estudos existentes, como para que novas propriedades sejam estudadas. A utilização de agregados reciclados de PET em matrizes cimentícias também se torna atrativa do ponto de vista da sustentabilidade, principalmente pela preservação de recursos naturais não renováveis, fato que também é justificativa do tema desta pesquisa.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar o comportamento mecânico e físico de concretos convencionais com substituição parcial do volume de agregado miúdo natural por agregado reciclado de Politereftalato de etileno (PET).

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Avaliar as propriedades mecânicas analisando a resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739: 2018) dos concretos, nas idades de controle de 7, 28 e 56 dias;
- Avaliar a dureza superficial do concreto em idade de controle de 585 dias através do esclerômetro de reflexão (ABNT NBR 7584: 2012);
- Avaliar o desempenho térmico das adições de PET através da condutividade térmica (ABNT NBR 15220 parte 5: 2005), nas idades de controle de 28 e 56 dias;
- Avaliar a composição do concreto na idade de controle de 585 dias através da verificação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (ABNT NBR 8802: 2019).

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco tópicos principais. O primeiro capítulo exhibe uma breve introdução sobre o tema da pesquisa, os objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica no qual o trabalho está embasado. O terceiro capítulo mostra os procedimentos metodológicos, os materiais utilizados, juntamente com dados básicos como composição granulométrica e massa específica.

O quarto capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos, enquanto que o quinto capítulo mostra a conclusão que se pode obter depois de ter observado todos os procedimentos e analisados todos os resultados nele, também são apresentadas

sugestões para trabalhos futuros, a fim de complementar e ter um aprofundamento maior nos dados estudados.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é abordado sobre o reaproveitamento do Politereftalato de etileno (PET) e de sua utilização na mistura do concreto. Ademais, é dissertado sobre a influência do PET no concreto e seu comportamento quanto as propriedades mecânicas e físicas.

2.1 Reaproveitamento do PET

O constante crescimento da população mundial tem promovido um crescimento de resíduos produzidos pelo homem. Segundo Leite (2009), a produção de plástico no mundo era de 6 milhões de toneladas, por ano, em 1960, passando para 110 milhões de toneladas, por ano, em 1994. No Brasil, o aumento da produção de plástico foi de 2,5 vezes, entre 1993 e 2007, chegando a 4,8 milhões de toneladas. O autor ainda levanta que, no Brasil, o consumo de garrafas PET, para embalagens de refrigerante e outras bebidas, iniciou em 1989. No ano de 2000, a produção atingiu 13 bilhões de garrafas, representando 70% das embalagens no setor de refrigerantes.

Nesse sentido, segundo Formigoni (2006),

[...] um dos piores problemas originados no descarte de materiais plásticos no Brasil é o espaço que ocupam nos aterros sanitários. Embora representem algo em torno de 10% do peso total do lixo, ocupam até 20% de seu volume, contribuindo para o aumento dos custos de coleta, transporte e descarte final dos resíduos urbanos (FORMIGONI, 2006, p. 15).

Prette (2004) informam que uma alternativa para reduzir o impacto ambiental e a criação de aterros sanitários é a não destinação final dos resíduos, reinserindo-os novamente no ciclo de produção, podendo ocorrer por duas rotas: reutilização e reciclagem.

Prette (2004) ainda diz que:

A concepção de reduzir, reutilizar e reciclar os resíduos foi enunciada na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (a Rio-92) como o Princípio dos 3R. Assim, dentro da cadeia de gestão de resíduos sólidos, busca-se reduzir o consumo de bens de maior impacto ambiental e a geração de resíduos, reutilizar os resíduos inevitavelmente gerados e reciclar os resíduos inevitavelmente gerados e não reutilizados (PRETTE, 2004, p. 6, grifo do autor).

Inicialmente, cabe destacar a diferença entre reutilização e reciclagem, visto que reutilização do produto é o reaproveitamento do mesmo na mesma função ou em outras possibilidades de uso, enquanto que reciclagem envolve o processamento, normalmente industrial, de um material em que ocorra mudança física ou química do mesmo (PRETEE, 2004).

Um dos materiais que leva mais tempo para se decompor, e que tem uma grande utilização em todo o mundo, é o PET. O qual pode ser encontrado de diversas formas no cotidiano das pessoas como, por exemplo, embalagens para bebidas e fibras para tecelagem (FORMIGONI, 2006).

O PET é um polímero termoplástico desenvolvido pelos químicos britânicos Whinfield e Dickson em 1941 (BELLIS, 2017). Por possuir propriedades termoplásticas, significa que o PET pode ser reprocessado, diversas vezes, pelo calor, devido as suas fracas ligações que unem suas moléculas (MATOS, 2009).

Na construção civil, tem sido cada vez mais comum a reutilização do uso de materiais de PET, em diferente campos, a fim de reduzir o volume de resíduos sólidos e os custos das obras. A substituição de tijolos, por garrafas PET, para casas sustentáveis (Figura 1 e 2) e a utilização de garrafas PET, em base de paredes (Figura 3), são alguns exemplos.

Figura 1 – Parede de garrafa PET unida com mistura de cal e cimento



Fonte: <http://www.oskaras.com/casa-de-garrafa-pet/> (2010 ou 2011)

Figura 2 – Parede de garrafa PET unidade com mistura de cal e cimento



Fonte: <http://www.oskaras.com/casa-de-garrafa-pet/> (2010 ou 2011)

Figura 3 – Detalhe da união das garrafas PET para base de parede



Fonte: Galli et al. (2012, p. 6)

2.2 Reciclagem do PET

A reciclagem do PET consegue atender os três pilares do desenvolvimento sustentável, trazendo benefícios sociais, econômicos e ambientais. Para o processo de reciclagem ocorrer, foi necessário que trouxesse benefícios as pessoas, gerando emprego e sendo rentável, gerando um novo setor industrial (ABIPET, 2012).

Assim como em qualquer lugar do mundo, no Brasil a indústria têxtil é a maior consumidora do insumo gerado na reciclagem, porém, somente no Brasil, a diversidade de uso permite que o valor pago pelo resíduo de PET mantenha o valor de mercado atrativo durante todo o ano, de maneira que mantenha-se as atividades de várias empresas, gerando empregos, para elas e para as Cooperativas e seus catadores (ABIPET, 2012).

Um grande exemplo de que a reciclagem é economicamente viável e os dados do último censo da reciclagem do PET no Brasil (ABIHPEC; ABINAM; ABIPET; ABIR, 2016), que mostra que, em 2016, mais de 90% das empresas de recicladores de PET têm mais de 5 anos de atividade no mercado. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIBET), um terço do faturamento de toda a Indústria Brasileira do PET provém da reciclagem, além de ter um crescimento anual superior a 11%, em média, desde 2000 (ABIPET, 2012).

Apenas o uso de garrafas PET já traz benefícios para o meio ambiente. Com a sua reciclagem, eles aumentam ainda mais, pois, além de destinar um fim econômico e sustentável para toneladas de resíduos que poderiam ser indevidamente destinada, ela economiza o uso de recursos naturais e energia (ABIPET, 2012).

O processo de reciclagem, no Brasil, iniciou aproximadamente, há 20 anos junto com a ABIPET, em 1995, onde a mesma representa cerca de 80% da Indústria do PET no Brasil. A reciclagem ocorre, basicamente, em três etapas, sendo recuperação, revalorização e transformação, que vai desde o descarte dos resíduos pela população até a utilização da matéria-prima de garrafas PET na fabricação de inúmeros produtos (ABIPET, 2012).

A etapa de recuperação evita que as garrafas acabem destinadas no lixo comum, sendo os maiores problemas a falta de coleta de lixo, em alguns municípios e/ou bairros. Na primeira parte da recuperação é feita a coleta seletiva e/ou a coleta dirigida, em que consiste a conscientização dos cidadãos em fazerem a separação do lixo por tipo de material, coletando-os em dias previstos e a conscientização da população para a separação e entrega do material em ponto de coleta, respectivamente. Após a coleta, o material passa pelas fases de triagem, em que consiste a separação do tipo, prensagem onde são compactadas e amarradas para facilitar o transporte e, pôr fim, a fase do fardo, ideal onde é a venda do fardo para as empresas que irão reciclar o PET (ABIPET, 2012).

Na etapa de revalorização, os fardos são desfeitos, lavados, separados dos outros tipos de materiais e classificados. Após a classificação é feita a moagem e lavagem do material e, logo após, o enxague. Após limpo o material, ele é separado por tipo de PET, e passa por processo de secagem e de classificação de partículas, até ser ensacado (ABIPET, 2012).

A etapa de transformação é onde será formado o produto final, de acordo com o comprador, podendo ser utilizado em vários setores, como em: aplicações têxteis, cordas e vassouras, chapas, filmes, resinas e tubos (ABIPET, 2012).

O 10º Censo da reciclagem do PET no Brasil mostrou que, em 2015, 65% da matéria-prima reciclada é entregue em forma de flocos, enquanto que 25% é em garrafas e 10% em forma de granulado. Os maiores consumidores dessa matéria-prima vão para a produção de resinas insaturadas e alquídicas, embalagens para alimentos e não alimentos e para a indústria têxtil (ABIHPEC; ABINAM; ABIPET; ABIR, 2016).

Figura 4 – Diferentes formas da matéria-prima reciclada: fardos (garrafa) na esquerda e em flocos na direita



Fonte: Adaptado de <http://www.abipet.org.br/> (2012 p. 6)

Nos últimos anos a atividade econômica da indústria de reciclagem de PET tem diminuído, isto se deve a redução no preço do petróleo e a dificuldade em se obter material PET para reciclagem. Com essa recaída no mercado, os empresários estão desmotivados a investirem no ramo de reciclagem (ABIHPEC; ABINAM; ABIPET; ABIR, 2016).

De acordo com o último censo a taxa de reciclagem atual no Brasil é de 51% em 2015, representando o total de 274.000 toneladas (ABIHPEC; ABINAM; ABIPET; ABIR, 2016). Mesmo com uma porcentagem boa, os valores são baixos, se considerados com os anos anteriores, como em 2012, que chegou a 331.000 toneladas, representando 58,9% de PET reciclado pós-consumo (ABIPET, 2012). Antes de atingir o auge, em 2012, o Brasil se mostrou destaque no cenário mundial, em 2009, ficando em segundo, com 55,6% de volume reciclado em cima do consumo virgem, ficando atrás apenas do Japão, com 77,9% (NÔUS; ABIPET, 2009).

Alguns exemplos da utilização do PET reciclado na construção civil é o uso como agregado para substituição parcial do agregado miúdo natural, a produção de telhas de PET (Figura 5) ou a produção de blocos de concreto (Figura 6).

Figura 5 – Telhas feita com PET reciclado



Fonte: <http://www.abipet.org.br/> (2012)

Figura 6 – Blocos de concreto vazado com resíduos de PET



Fonte: Sousa et al. (2014, p. 8)

2.3 Concretos e argamassas com adição de PET

Uma das diversas maneiras de utilizar o PET, na construção civil, é adicioná-lo a matrizes cimentícias, como uma porcentagem do agregado miúdo. Por ainda estar em processo de pesquisa, há muitos questionamentos sobre quais os teores devem ser utilizados e quais serão os comportamentos dos concretos e argamassas frente às suas propriedades mecânicas e físicas.

Canellas (2005) desenvolveu um estudo na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro sobre substituição parcial do agregado miúdo em argamassas por areia PET, com porcentagens de substituição de 10%, 30% e 50% do agregado miúdo por agregado de PET. Realizou-se o estudo com o objetivo de avaliar o desempenho das argamassas visando a avaliação para a produção de peças de concretos pré-moldado. A autora concluiu que o dimensionamento dos traços deve ser feito com substituição em volume para manter o equilíbrio entre a quantidade de agregado miúdo e agregado de PET e que nesses traços devem ser recalculado a relação água/cimento devido ao PET ser um polímero com características hidrofóbicas. A autora notou que o aumento da absorção de água juntamente com o aumento dos teores é devido ao agregado de PET tornar a argamassa mais porosa fazendo com que a matriz cimentícia tenha uma quantidade absorvida de água maior que a quantidade necessária para sua hidratação, ocasionando o surgimento de fissuras na interface do agregado com a matriz cimentícia. Outro fator que Canellas (2005) observou em seu estudo, foi a influência das dimensões dos grãos de PET maiores que 3 mm no aumento da formação de microfissuras na zona de transição entre a matriz e o agregado, devido ao seu formato ser preferencialmente lamelar e de baixa rugosidade, aconselhando que seja trabalhado com grãos próximos a 1,41mm no objetivo de formato cubico melhorando assim o desempenho.

Jardim (2016) estudou as propriedades mecânicas de concretos convencionais com substituição em volume de areia de PET (10% e 15%) ao agregado miúdo natural. A autora avaliou a resistência a compressão axial pela ABNT NBR 7215:1997 e a resistência a tração por compressão diametral pela ABNT NBR 7222:2011. Após o termino dos experimentos os resultados passaram por uma análise estatística (ANOVA). A autora concluiu que os teores de substituição estudados (10% e 15%) não foram significativos (não influenciaram as variáveis de resposta), deixando

sugestão da possibilidade para o uso do resíduo no concreto sem perda de propriedades mecânicas, com a observação para a necessidade de mais testes.

Vaz (2016) realizou um estudo sobre as propriedades mecânicas, no estado fresco e endurecido, de argamassas modificadas com substituição em volume de areia de PET (5%, 15% e 30%) ao agregado miúdo natural. A autora avaliou no estado fresco a consistência da argamassa e no estado endurecido a absorção por capilaridade e a resistência a compressão e a tração na flexão segundo a ABNT NBR 13279:2005. A autora concluiu que no estado fresco há diminuição da densidade da argamassa com o aumento das substituições dos agregados naturais por reciclados devido a massa específica da areia de PET ser menor do que a do agregado miúdo natural. No estado endurecido, concluiu que a substituição de 5% e 15% do agregado natural por reciclado melhorou as propriedades mecânicas das misturas investigadas (resistência a tração na flexão e a resistência à compressão axial), ao contrário da substituição de teor de 30%. Em relação aos ensaios de absorção de água, a autora concluiu que as amostras com substituição apresentaram melhores resultados, sendo a substituição com teor de 15% a mais significativa. A autora levanta a hipótese de que a amostra com teor de 30% apresentou um coeficiente maior que os teores de 5% e 15% devido a sua face apresentar-se mais porosa que as outras, contribuindo para a absorção.

Pietrobelli (2010) estudou a viabilidade do PET reciclado em concreto sob o aspecto de resistência a compressão axial. O autor realizou dois traços de referências (± 30 MPa e ± 45 MPa) e, para cada traço, foram feitas substituições parciais do agregado miúdo com teores de 15%, 30% e 45%. O autor utilizou um método de dosagem empírica a fim de entender somente o comportamento mediante aos diferentes teores de substituição. Em função de ter executado os traços em massa, o autor concluiu que, devido ao aumento da quantidade de PET, foi necessário realizar uma correção para o traço. A proporção de cimento e agregado reciclado não se manteve uniforme, sendo necessário ajuste, para cada traço, com teor de agregado reciclado. O autor concluiu ser inviável sob o aspecto de resistência a compressão axial, que os concretos confeccionados se tornaram inviáveis, principalmente devido à perda de resistência ocasionada pelo PET.

2.4 Revisão das propriedades mecânicas e físicas

As propriedades do material pode se alterar conforme sua composição e características sendo, estas, de suma importância para definição de aplicabilidade do material.

Nesse estudo são avaliadas as propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e a dureza superficial do concreto) e físicas (condutividade térmica e a velocidade de propagação de onda ultrassônica) dos concretos com e sem substituição parcial do agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET. Os itens 2.4.1 à 2.4.4 apresentam uma abordagem detalhada das propriedades que serão analisadas.

2.4.1 Resistência à Compressão Axial

O ensaio à compressão sempre esteve relacionado à idade de 28 dias. Apesar do crescimento da resistência do concreto poder ser observado até os 360 dias, claramente, grande parte da resistência final é alcançada aos 28 dias. A partir dessa idade o crescimento se torna menos significativo (BAUER, 2000).

Segundo Bauer (2000), já foram estudados e testados vários métodos devido a necessidade de controle na produção de concreto. Neste contexto, a NBR 5739 (ABNT, 2007) é a norma brasileira que abrange o ensaio de compressão para corpos de prova cilíndricos de concreto, sendo respeitados os procedimentos de moldagem e cura inicial do concreto da NBR 5738 (ABNT, 2016).

2.4.2 Avaliação da dureza superficial

Avaliar a dureza superficial é um bom método para verificar a uniformidade da dureza e pode ter uma estimativa da resistência a compressão do concreto. A avaliação é feita pelo esclerômetro de reflexão, tendo em vista a vantagem de ser um método de ensaio não destrutivo (ABNT, 2012).

O esclerômetro é um equipamento leve, simples e barato de operar. Com ele é possível avaliar a uniformidade da resistência mecânica, *in loco*, sem condenar a estrutura (EVANGELISTA, 2002). Contudo, seus resultados podem apresentar

variações, devido a influência de fatores como: umidade, uniformidade da superfície, carbonatação e rigidez da estrutura (FONTANA, 2015).

Por ser um equipamento de baixo capital, para aquisição, de fácil manuseio e portátil, acaba sendo uma ótima saída para averiguação da condição do concreto. A sua variabilidade nos resultados pode ser contornada realizando um número maior de ensaios, sem comprometer a superfície da amostra (JUNGES, 2016).

Como o estudo realizado por Junges (2016), o ensaio com o esclerômetro de reflexão permite um mapeamento da dureza superficial do concreto, sendo possível localizar alguma irregularidade na resistência do concreto, podendo ser realizados ensaios complementares nas regiões que obtiverem baixos índices esclerométricos.

2.4.3 Propriedades Térmicas

Conforto térmico pode ser definido como a satisfação psicológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente (ABNT NBR 15220-1, 2005). De acordo com Angelin (2014), o conforto térmico é um dos principais requisitos para que os ambientes apresentem melhores níveis de habitabilidade, sendo que sua importância está ligada, além do conforto do usuário, ao desempenho no trabalho e na saúde do usuário.

Senger (2012) define condutividade térmica como uma propriedade física dos materiais, no qual é descrita como a habilidade dos mesmos de conduzir calor, sendo essa uma das principais propriedades que influenciam no conforto térmico das edificações.

A condutividade térmica é a propriedade do material de conseguir transferir calor, sendo relacionado ao fluxo de calor por condução. Na Engenharia Civil se torna um importante parâmetro físico, sendo, por meio deste, capaz de estimar o fluxo de calor, por exemplo, através de uma parede (SACHT; ROSSIGNOLO; SANTOS, 2010).

Com o intuito de reduzir os índices de condutividade térmica e aumentar, assim, a eficiência das edificações, são testados diferentes materiais e seu comportamento como isolante térmico.

Pressette e Pelisser (2012) realizaram um estudo sobre a condutividade térmica de paredes de concreto com adições (10% e 20% do volume) de borracha reciclada de pneus. O concreto com 10% de adição teve uma redução do índice de condutividade térmica próximo de 20%, enquanto que, para argamassas com as

mesmas porcentagens de adição da borracha, elas mostraram redução de 60% do índice, para 20% de adição.

Gonçalves e Tommaselli (2014) realizou um estudo da condução térmica em concretos produzidos com a incorporação de diferentes concentrações (5% e 10%) de PET, sendo os corpos moldados com cimento, areia, brita 0, PET e água. O autor verificou que, para o ensaios de referência e concentração de 5%, não houve mudança significativa, porém, a concentração de 10% apresentou um desempenho melhor do material como isolante térmico.

2.4.4 Velocidade de propagação de onda ultrassônica

O método de propagação de onda ultrassônica teve início na década de 40, com Leslie e Cheesman, no Canadá, utilizando o instrumento sinuscópio e com Jones, na Inglaterra, utilizando o *Ultrasonic Concrete Tester (UCT)*. A diferença no princípio de funcionamento desses equipamentos estava na frequência de ressonância dos transdutores. No UCT, essas frequências eram na faixa de 150 kHz, que limitava a distância entre os transdutores em 2 metros, enquanto que, no siniscópio, a frequência era na ordem de 20 kHz, permitindo leituras em peças de concreto mais espessas. No entanto, a falta de um mostrador digital para as leituras dificultava a aplicação do método para avaliação de concretos (MEDEIROS, 2007).

Somente no início dos anos 70 se viabilizou a utilização de ultrassom, em estruturas de concreto, com o surgimento do *Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Tester (PUNDIT)*, sendo um equipamento portátil, de pouco peso, bateria interna e com mostrador digital de tempo de propagação da onda ultrassônica. Com frequência de 50 kHz, o PUNDIT pode ser utilizado em peças de concreto com dimensões de até 20m (MEDEIROS, 2007).

Através da velocidade de propagação de onda ultrassônica, pelo concreto, é possível obter alguns dados físicos como a homogeneidade do concreto, alguma possível falha interna, fissura, ou outras imperfeições, e monitorar possíveis variações no concreto, devido à ações do meio (ataque químico), principalmente de sulfatos (ABNT NBR 8802: 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados os materiais que foram utilizados e os métodos abordados para obtenção dos resultados, de acordo com os objetivos anteriormente citados.

3.1 Programa experimental

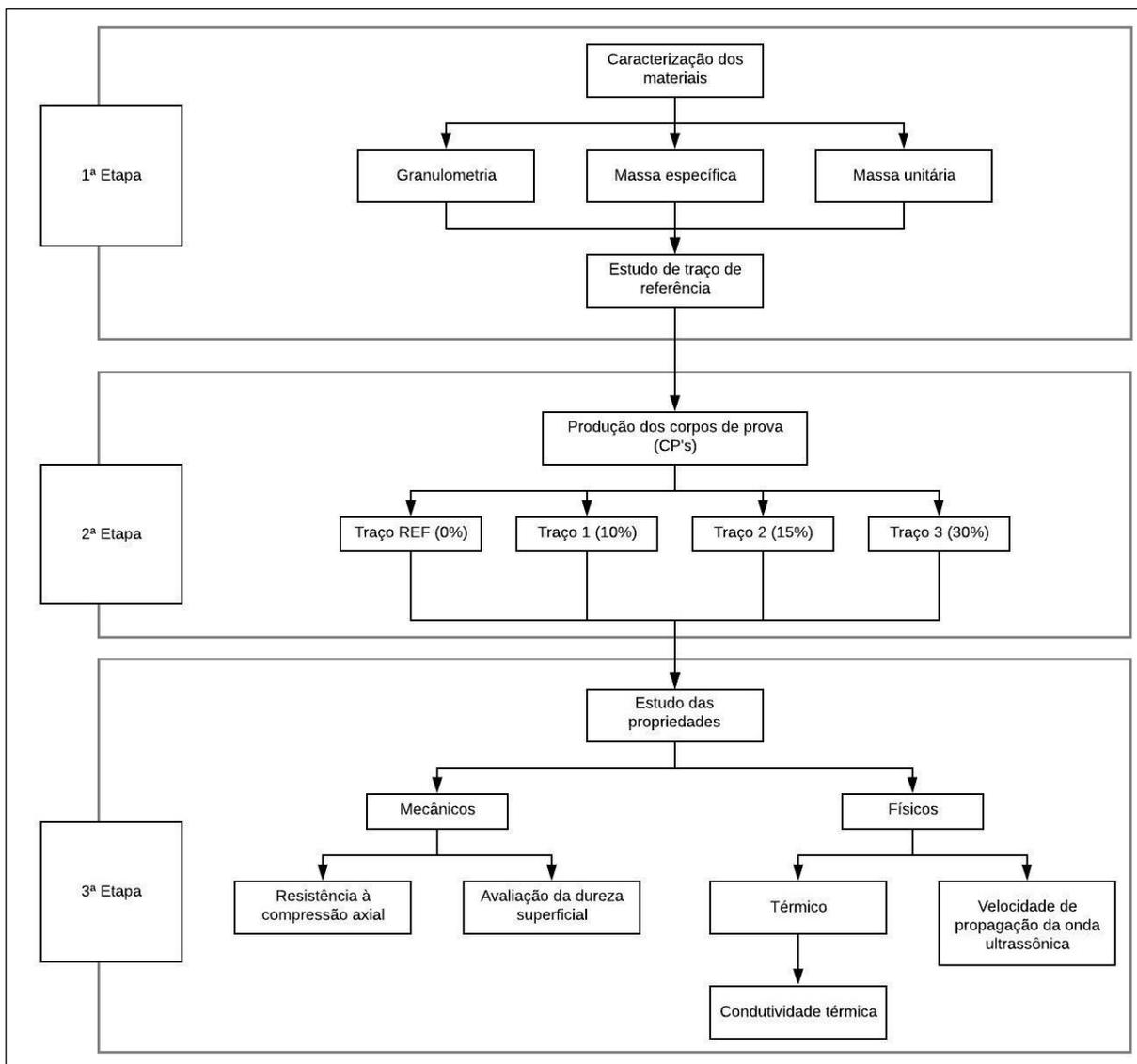
O programa experimental está dividido em três etapas distintas: a) caracterização dos materiais, b) produção dos concretos e c) realização dos ensaios. Todas as etapas do Programa Experimental foram desenvolvidas no Laboratório de Materiais do curso de Engenharia Civil da UNIPAMPA – campus Alegrete/RS.

Através de um traço definido, foram desenvolvidos dois tipos de concreto: com substituição parcial em volume de agregado miúdo por agregado de PET e um concreto sem adição de PET (concreto de referência), para fins comparativos.

Os concretos com PET diferenciam-se, entre si, pela porcentagem de substituição em volume da areia natural por areia de PET. Os teores substituição de agregado miúdo natural por agregado miúdo de PET foram definidos a partir dos estudos de Jardim (2016), no qual a autora apontou que traços de concreto tem perda significativa das propriedades mecânicas. Para esta pesquisa, foram definidos como teores de substituição os percentuais de 10%, 15% e 30%.

Após a confecção e cura, os concretos foram analisados, no estado endurecido, quanto suas propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e avaliação da dureza superficial pelo método do esclerômetro de reflexão) e físicas (desempenho térmico e velocidade de propagação da onda ultrassônica). A Figura 8 apresenta o detalhamento do programa experimental que foi utilizado neste estudo.

Figura 8 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaboração própria

3.2 Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais empregados para a produção dos concretos, mostrados nos itens 3.2.1 a 3.2.4, tem por objetivo verificar se os materiais utilizados nos ensaios atendem aos requisitos mínimos delimitados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Além disso, a caracterização dos materiais permite levantar parâmetros para os resultados, podendo indicar causas em resultados destoantes.

3.2.1 Cimento Portland

Devido a disponibilidade da região e do município de Alegrete - RS, o estudo foi conduzido utilizando cimento Portland CP IV – 32. Para categorização das propriedades, o ensaio de massa específica do cimento foi executado segundo a NBR NM 16605 (ABNT, 2017) e apresentando um resultado de 2,81 g/cm³. As informações físico/químicas foram fornecidas pelo fabricante, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Exigências físicas, mecânicas e químicas do cimento Portland CPIV – 32

Ensaio Químicos			
Ensaio	Unidade	Resultados	Exigências
Óxido de Magnésio - MgO	%	5,6	≤6,5
Trióxido de Enxofre - SO ₃	%	1,9	≤4,0
Perda ao Fogo	%	3,1	≤6,5
Resíduo Insolúvel	%	33,6	Não aplicável
Ensaio Físicos			
Ensaio	Unidade	Resultados	Exigências
Expansibilidade à quente	mm	0	≤5,0 mm
Início de Pega	min	314,6	≥60 min
Fim de Pega	min	382,1	≤600 min
Água de consistência normal	%	31,6	Não aplicável
Área específica (Blaine)	cm ² /g	4334	Não aplicável
Índice de finura - # 200	%	0,6	≥8,0 %
Índice de finura - # 325	%	2,4	Não aplicável
Resistência à Compressão Axial			
Ensaio	Unidade	Resultados	Exigências
Resistência à Compressão - 3 dias	MPa	19,8	≥10 MPa
Resistência à Compressão - 7 dias	MPa	24,3	≥20 MPa
Resistência à Compressão - 28 dias	MPa	36,8	≥32 MPa

Fonte: Dados fornecidos pela empresa Votorantim (2018).

3.2.2 Agregado Miúdo Natural

Como agregado miúdo natural foi utilizada areia natural comercializada pela empresa *Areeira Bairro* e proveniente de Manoel Viana – RS. Para fins comparativos dos dados, foi obtida a composição granulométrica seguindo os procedimentos da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e a massa unitária pela NBR NM 45 (ABNT, 2006). A Tabela 2 apresenta os valores de massa específica e massa unitária do agregado no

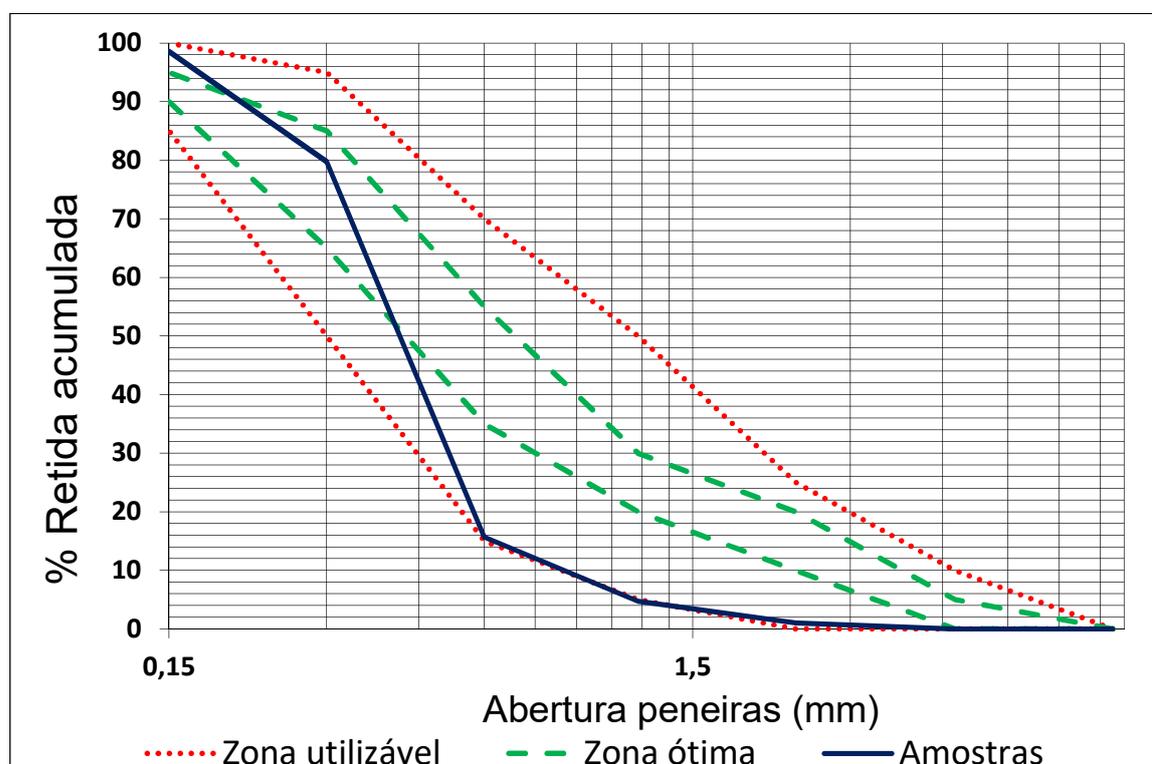
estado solto, e o Gráfico 1 mostra a curva granulométrica do agregado miúdo natural. A tabela da composição granulométrica está apresentada no apêndice A.

Tabela 2 – Massa unitária e específica do agregado miúdo natural

Massa unitária	1596 kg/m ³
Massa específica	2639 kg/m ³

Fonte: Autoria própria

Gráfico 1 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural



Fonte: Autoria própria

3.2.3 Agregado Miúdo Reciclado

O agregado reciclado de PET, utilizado (Figura 9), é proveniente da empresa **Petceu Indústria e Comércio de Reciclagem Plástica Ltda.**, localizada no município de Céu Azul – PR. A areia de PET utilizada nessa pesquisa é da cor branca, devido a facilidade de aquisição desse material.

Antes dos ensaios de caracterização, o agregado foi passado por um peneiramento (peneira 4,75mm) para retirada de flocos e/ou impurezas que poderiam estar presentes no material.

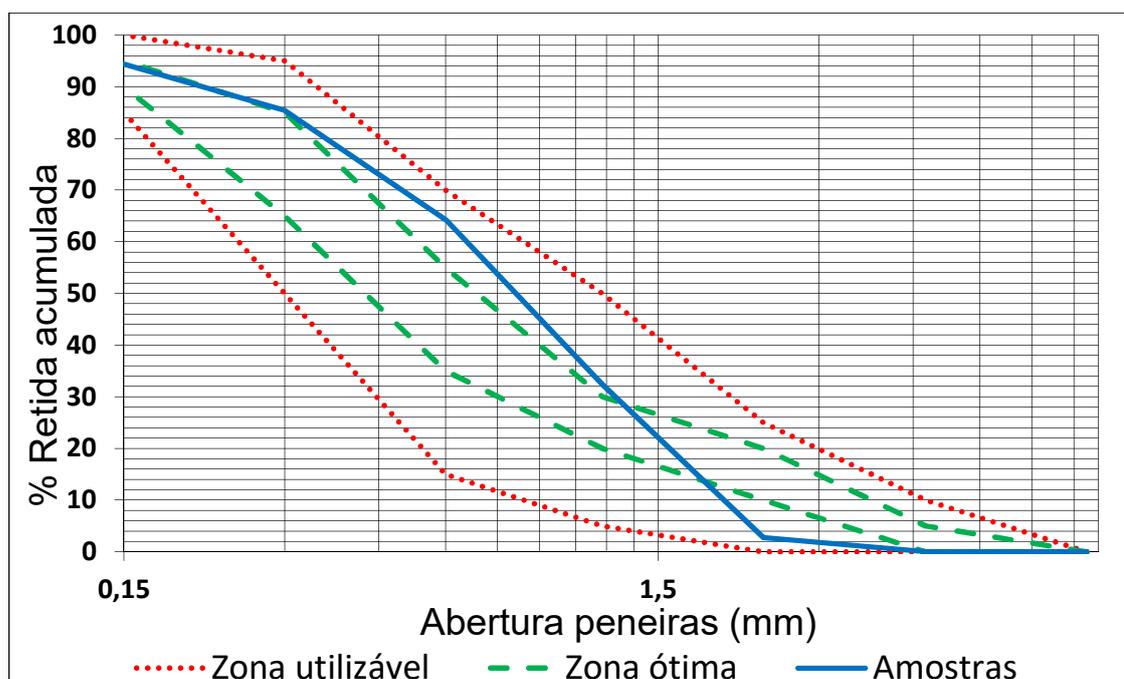
Figura 9 – Areia de PET



Fonte: Elaboração própria

O estudo de Jardim (2016) utilizou o mesmo agregado reciclado de PET, onde se obteve uma composição granulométrica situada na zona ótima. A sua curva granulométrica pode ser observadas no Gráfico 3 e a tabela com a sua composição granulométrica encontra-se no Apêndice B.

Gráfico 3 – Curva granulométrica do agregado miúdo de PET



Fonte: Autoria própria

Após a determinação de seu módulo de finura (MF = 2,00), de acordo com a classificação de Bauer (2008), a areia de PET pode ser considerada uma areia fina.

3.2.4 Agregado Graúdo

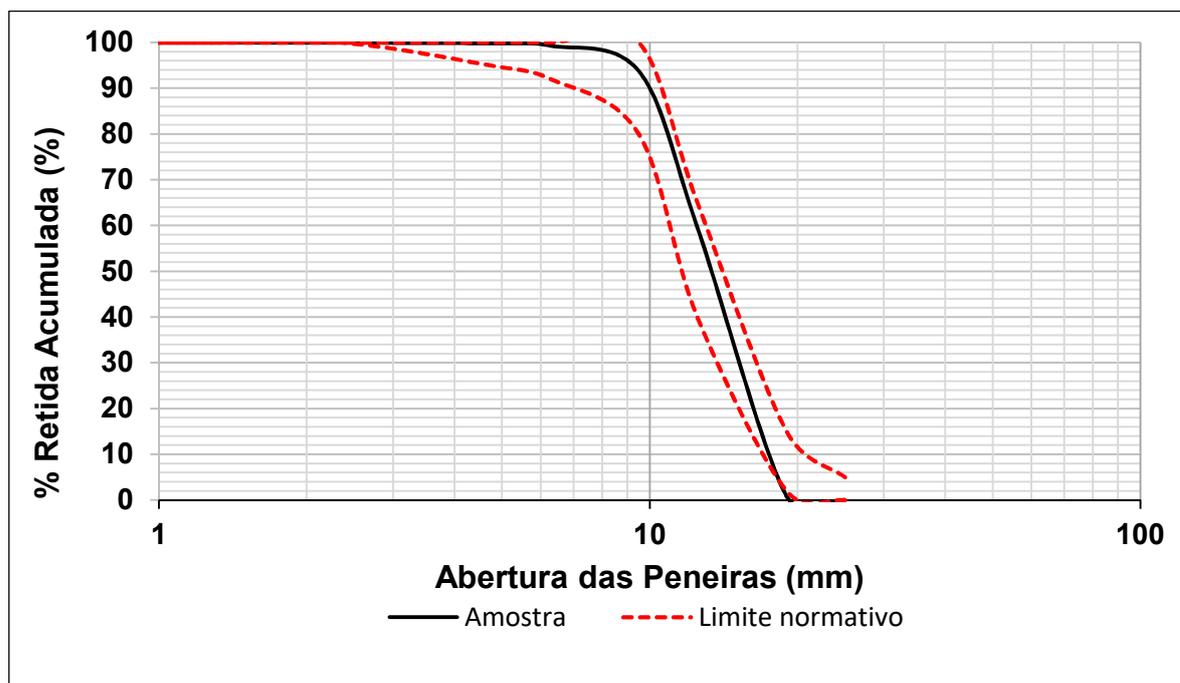
Para o agregado graúdo, foi utilizada brita de origem basáltica (diâmetro máximo de 19mm e Módulo de Finura = 6,94), produzida na Pedreira Rosada, localizada próxima ao município de Alegrete – RS. Assim como o agregado miúdo natural, a composição granulométrica foi obtida seguindo as instruções da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e a massa unitária da NBR NM 45 (ABNT, 2006). A Tabela 3 apresenta os valores da massa unitária no estado seco e da massa específica do material, e o Gráfico 4 apresenta a curva granulométrica do agregado. A tabela com a composição granulométrica do agregado pode ser visualizada no Apêndice C.

Tabela 3 – Massa unitária e específica do agregado graúdo

Massa unitária	1485 (kg/m ³)
Massa específica	2730 (kg/m ³)

Fonte: Autoria própria

Gráfico 4 – Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autoria própria

3.3 Definição dos traços

Os traços definidos para a produção dos concretos são apresentados na tabela 4, junto com os valores dos materiais utilizados e a trabalhabilidade dos concretos (Slump Test) obtido em cada traço.

Tabela 4 – Traços estudados e seus quantitativos de materiais

Traço unitário (em massa)		Cimento	Areia	Brita	a/c	
		1	2,06	2,94	0,51	
Traços	Cimento (kg)	Areia (kg)	PET (l)	Brita (kg)	Água (kg)	Slump Test (cm)
REF	13,00	26,78	0,00	38,22	6,63	7,00
10PET	13,00	24,10	1,64	38,22	6,63	8,00
15PET	13,00	22,77	2,46	38,22	6,63	10,00
30PET	13,00	18,74	4,93	38,22	6,63	12,00

REF – concreto de referência (sem areia de PET);

10PET – concreto com substituição em volume de 10% do agregado miúdo por areia de PET;

15PET – concreto com substituição em volume de 15% do agregado miúdo por areia de PET;

30PET – concreto com substituição em volume de 30% do agregado miúdo por areia de PET;

Fonte Autoria própria

3.3.1 Moldagens dos concretos

A moldagem e a cura dos concretos foram realizadas de acordo com as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2016). A norma especifica as dimensões e o procedimento de cura e ensaio para compressão axial.

3.4 Ensaios de mecânicos

Os ensaios mecânicos de controle foram realizados com auxílio de uma prensa INSTRON, modelo 5590-HVL Series, nas idades de controle 7, 28 e 56 dias. A Figura 10 mostra um ensaio mecânico quando estava na fase de andamento.

Figura 10 – Rompimento do corpo de prova



Fonte: Autoria própria

3.4.1 Ensaio de resistência à compressão axial

A resistência a compressão axial dos concretos foi obtida de acordo com NBR 5739 (ABNT, 2007). Para esse ensaio foram utilizados três corpos de prova cilíndricos, com 100mm de diâmetro e 200mm de altura, traço e idade de controle (7, 28 e 56 dias). A Figura 11 apresenta algumas amostras após a desmoldagem e a retificação da superfície.

Figura 11 – Corpos de provas (CP's)



Fonte: Autoria própria

3.4.2 Ensaio de esclerometria de reflexão

O ensaio realizado com o Esclerômetro de Reflexão é um ensaio não destrutivo, que mede a dureza superficial do concreto endurecido, fornecendo dados para avaliação da qualidade do concreto. A execução do ensaio é regida pela NBR 7584 (ABNT, 2012). A norma requer, para a realização do ensaio, um aparelho esclerômetro, uma bigorna para calibração e um disco de desgaste para tratar a superfície da área de ensaio, conforme é mostrado na Figura 12 abaixo.

Figura 12 – Materiais para esclerometria: 1) Bigorna; 2) Disco de desgaste; 3) Esclerômetro de reflexão



Fonte: Padoin (2017, p. 57)

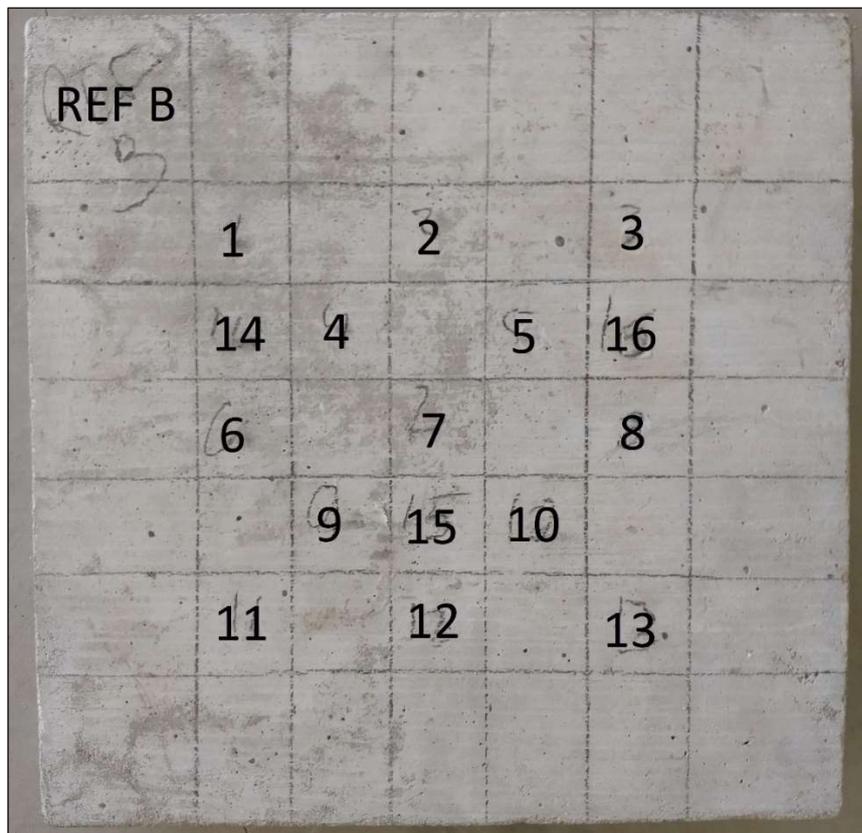
Segundo a NBR 7584 (ABNT, 2012), o Esclerômetro consiste fundamentalmente de uma massa-martelo que, impulsionada por uma mola, se choca, através de uma haste, com ponta em forma de calota esférica, com a área de ensaio. Conforme a norma explica, quando a haste é pressionada contra a superfície da amostra, a massa-martelo profere um golpe, onde o choque faz com que aconteça uma reflexão; esta reflexão empurra a massa-martelo, onde a posição é marcada no indicador, na lateral do esclerômetro. Em consequência disso, pode-se dizer que, quanto maior a dureza da superfície, menor será a energia utilizada na deformação permanente, consequentemente, maior será a parcela de energia gasta na forma elástica, sendo maior a reflexão do martelo.

Antes de realizar o ensaio, a norma recomenda que o aparelho seja calibrado e após a cada 300 golpes, recomenda novamente a sua calibração. Para uma melhor calibração, deve-se proferir dez (10) golpes na superfície da bigorna e o valor médio do índice esclerométrico deve ser superior a 75.

A norma requisita ainda que a superfície do ensaio deve estar seca ao ar, limpa, preferencialmente plana. Preparada a amostra, o esclerômetro é posicionado, de tal maneira que o operador consiga pressionar o embolo contra superfície do concreto. Quando o embolo é pressionado junto com o martelo contra superfície, a trava libera o martelo, fazendo com que a energia seja aplicada na superfície através da haste e enviando de volta a energia restante contra a mola. O martelo recebe a energia e volta a posição inicial, podendo ser feita a leitura da medida do impacto refletido, também chamado de índice esclerométrico.

Este ensaio foi realizado em dois corpos de provas, por traços com dimensões de 250mm x 250mm x 44mm. Foram realizados 16 golpes por placa nos pontos marcados de forma aleatória, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Marcação das leituras do índice esclerométrico no CP



Fonte: Autoria própria

3.5 Ensaios de físicos

Nos itens 3.5.1 e 3.5.2 serão detalhados os ensaios físicos que foram abordados nessa pesquisa.

3.5.1 Ensaio de condutividade térmica

Para avaliação da condutividade térmica foram moldados quatro corpos de prova, por traço. A determinação da condutividade térmica dos concretos seguiu as prescrições da NBR 15220 – PARTE 5 (ABNT, 2005), sendo ensaiado duas amostras com idade de 28 dias e duas amostras com idade de 56 dias. A avaliação foi realizada no Laboratório de Mecânica Aplicada da UNIPAMPA – Campus Alegrete através do ensaio no equipamento LaserComp F305 (Figura 14).

O equipamento foi previamente regulado para realizar a leitura da condutividade térmica entre as temperaturas de 20°C e 40°C. O equipamento faz a leitura da espessura da amostra, automaticamente, como mostrado na Figura 14, e começa a aquecer as placas inferiores e superiores à temperatura ajustada, após as placas atingirem as temperaturas desejadas o equipamento lê os dados até a temperatura inferior se igualar a superior, onde essa transferência de calor se dá através do corpo de prova. O cálculo da condutividade térmica é realizado pelo software do equipamento através da Equação 1.

$$K = \frac{N \cdot Q \cdot \Delta x}{\Delta T} \quad \dots(1)$$

Onde:

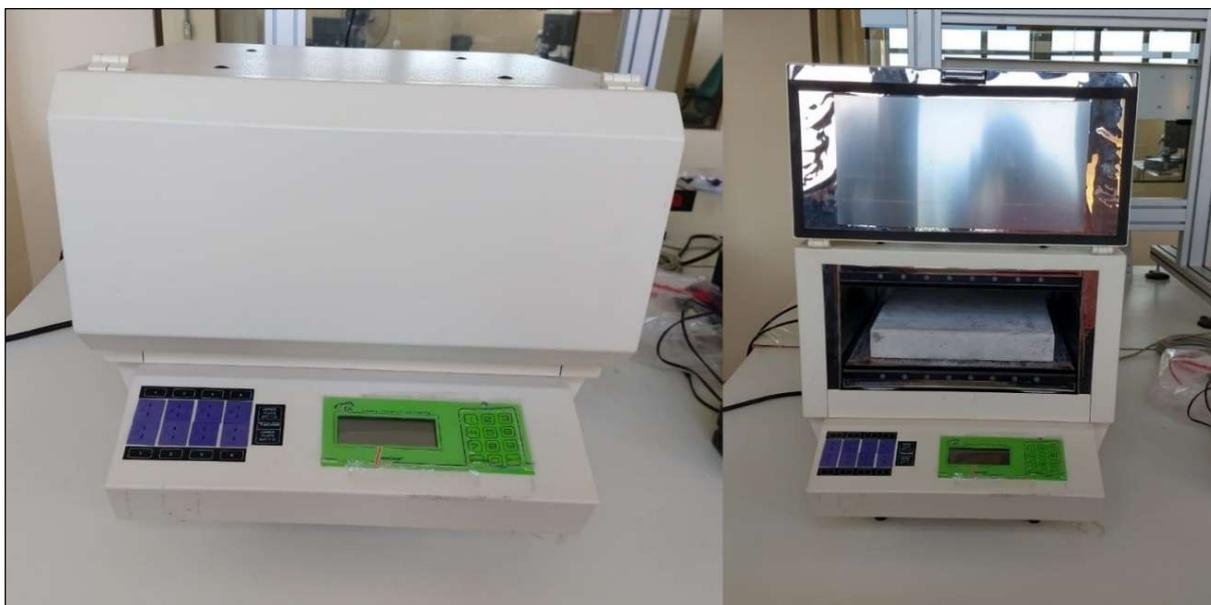
K = condutividade térmica em W/m.K;

N = fator de calibração do equipamento em W/(m.K.cm);

ΔT = diferença entre a temperatura das placas quente e fria em mV;

As placas de concreto (com dimensões de 250mm por 250mm por 43mm), antes de serem ensaiadas, foram acondicionadas em estufa à uma temperatura de 60°C, até atingirem a constância de massa.

Figura 14 – LaserComp F305



Fonte: Autoria própria.

3.5.2 Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica

A determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica foi realizada nos corpos de provas (dimensões de 250 x 250 x 44mm), com idade de 585 dias, sendo realizado em dois pontos de cada placa de concreto e duas placas para cada teor de substituição de PET, seguido as normas da NBR 8802 (ABNT 2019).

O equipamento utilizado foi o PUNDIT plus (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester), que significa “testador ultrassônico não-destrutivo indicador digital portátil”, no qual atende ter capacidade de vibração de onda longitudinal acima de 20kHz.

Para uma melhor leitura, os transdutores que emitem e recebem as ondas de vibração foram apoiados em uma peça de madeira para terem mesma altura e melhorar a precisão de leitura e foi aplicada uma pequena camada de vaselina nas faces dos transdutores para corrigir qualquer irregularidade que houvesse nas faces das placas. Enquanto que o aparelho foi calibrado através do cilindro de alumínio como especifica a norma.

A Figura 15 mostra o esquema montado juntamente com o aparelho, o cilindro de alumínio, a vaselina e a placa de concreto sendo ensaiada.

Figura 15 – Materiais utilizados no ultrassom: 1) Cilindro de alumínio; 2) Aparelho PUNDIT; 3) Vaselina; 4) Transdutores (emissor e receptor); 5) CP



Fonte: Autoria própria

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O capítulo quatro está dividido em quatro itens (4.1 a 4.4), que apresentam a análise e discussão dos resultados dos ensaios mecânicos (resistência a compressão axial e dureza da superfície) e ensaios físicos (condutividade térmica e homogeneidade através da propagação de onda ultrassônica).

Para melhor entendimento foram utilizadas as nomenclaturas REF, 10PET, 15PET e 30PET para, respectivamente, os traços com 0, 10%, 15% e 30% de substituição do volume de agregado miúdo natural, por agregado miúdo de PET.

4.1 Avaliação da resistência à compressão axial

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão axial, nas idades de controle de 7, 28 e 56 dias.

Tabela 5 – Resultados da resistência a compressão axial dos CP's

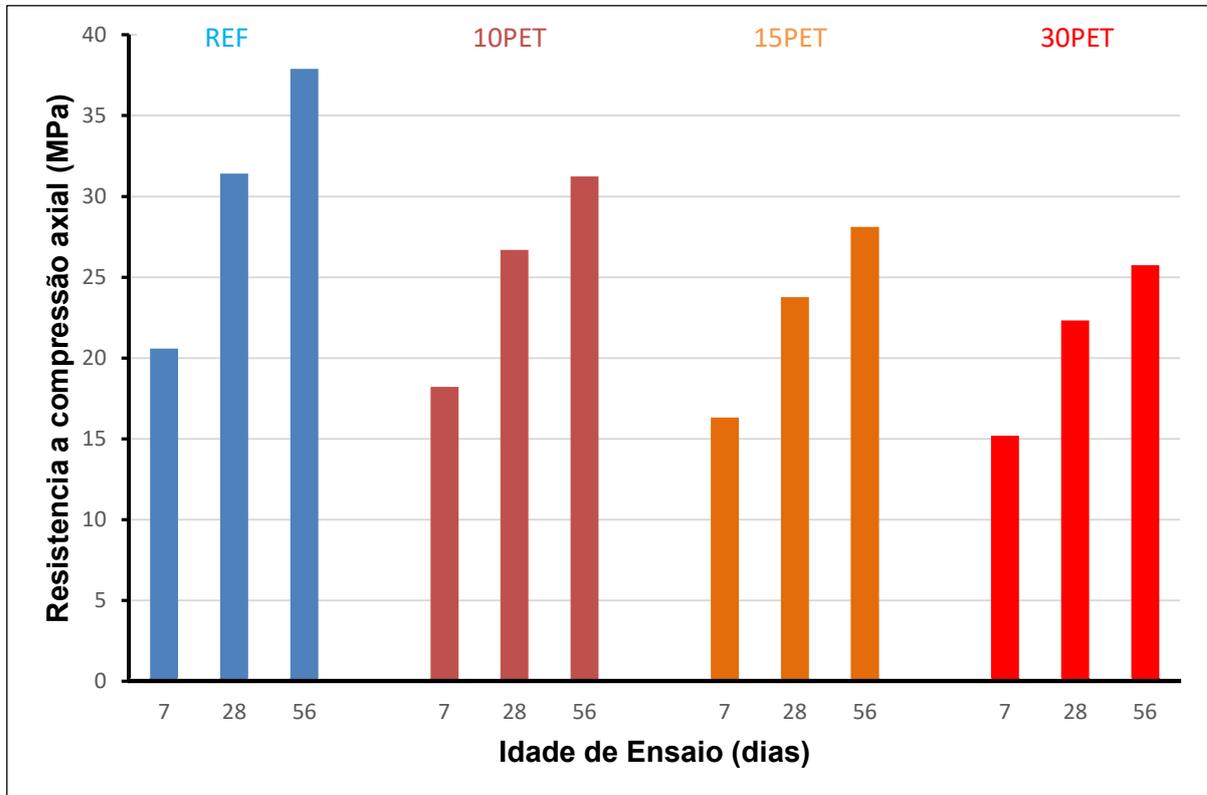
DIAS	REF - 04/04		10% - 04/04		15% - 11/04		30% - 11/04	
	kN	Mpa	kN	Mpa	kN	Mpa	kN	Mpa
7	153,33	19,52	144,85	18,44	133,05	16,94	114,98	14,64
	170,14	21,66	139,67	17,78	123,37	15,71	119,30	15,19
	161,37	20,55	146,54	18,66	128,96	16,42	119,54	15,22
28	249,89	31,82	187,26	23,84	154,61	19,69	177,44	22,59
	206,62	26,31	214,42	27,30	194,09	24,71	173,33	22,07
	243,57	31,01	204,96	26,10	179,42	22,84	175,00	22,28
56	308,66	39,30	242,92	30,93	225,50	28,71	190,30	24,23
	180,84	23,03	213,64	27,20	220,19	28,04	170,76	21,74
	286,70	36,50	247,63	31,53	216,29	27,54	214,13	27,26

Fonte: Autoria própria

Alguns resultados discrepantes (Tabela5) podem ter ocorrido devido à alguma falha no processo, como moldagem ou uniformização do topo do corpo de prova para ensaio. Para uma melhor padronização dos resultados, foi realizado um tratamento nos dados. Foram retirados os resultados que excederam a média em 8% ou mais. Nos casos que não houve resultados fora da média, foram retirados os valores que não influenciavam na média, objetivando obter uma mesma quantidade de dados por traço, para as análises de variância (ANOVA).

Os resultados médios de resistência à compressão axial – após o tratamento dos dados – são apresentados no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Resistencia da compressão axial após tratamento de dados

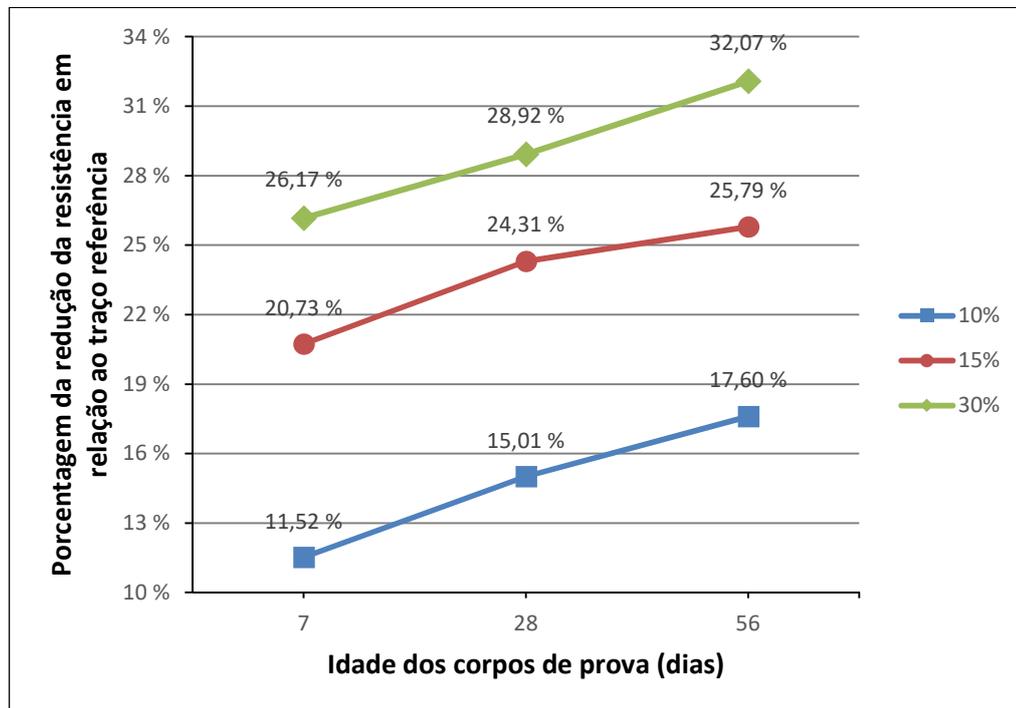


Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados médios, mostrados no Gráfico 5, observa-se duas tendências de comportamento, de aumento da resistência à compressão axial com o passar do tempo e de uma diminuição da resistência à compressão axial com o aumento do teor de PET nas misturas.

Para analisar melhor esse comportamento, o Gráfico 6 mostra o percentual de decréscimo da resistência a compressão axial com a variação do teor de PET nos concretos, tendo como base o traço REF.

Gráfico 6 – Percentual de decréscimos da resistência dos concretos em relação ao traço de referência



Fonte: Autoria própria

O Gráfico 6 mostra que, a medida que se aumenta a porcentagem de PET, nos traços e a idade de ensaio, ocorre uma maior diferença percentual da resistência a compressão axial dos concretos com PET em relação ao traço de REF.

Objetivando obter a real influência das variáveis independentes (Teor de PET e a Idade de ensaio) – consideradas nessa pesquisa –, no resultado avaliado (resistência a compressão axial) foi realizado uma análise de variância (ANOVA), cujo os resultados são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Análise de variância ANOVA da resistência a compressão axial

ANÁLISE ANOVA					
ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p
Interseção	14757,87	1	14757,87	11248,92	0,000000
Teor PET	270,20	3	90,07	68,65	0,000000
Idade	712,30	2	356,15	271,47	0,000000
Teor PET*Idade	26,21	6	4,37	3,33	0,036167
Error	15,74	12	1,31		

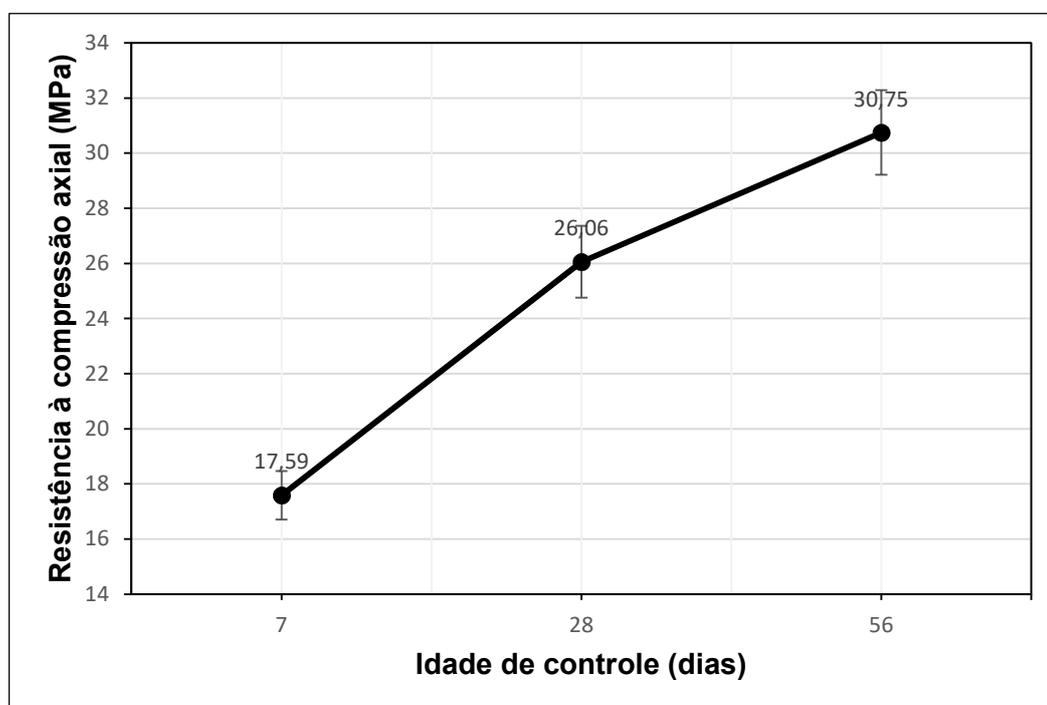
Fonte: Autoria própria

A ANOVA é uma técnica de estatística onde a análise visa verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem uma influência significativa ($p \leq 0,05$) em alguma variável, podendo, assim, chegar a 95% de confiabilidade nos dados.

Os resultados da Tabela 6 mostram que os fatores “Idade” e “Teor de PET” são fatores significativos ($p < 0,05$) e a correlação entre eles – “Teor PET * Idade” – também se mostrou significativa.

O Gráfico 7 mostra a influência da Idade de ensaio na resistência a compressão axial dos concretos, gerado através dos valores da análise de variância (ANOVA).

Gráfico 7 – Resistência x idade de controle

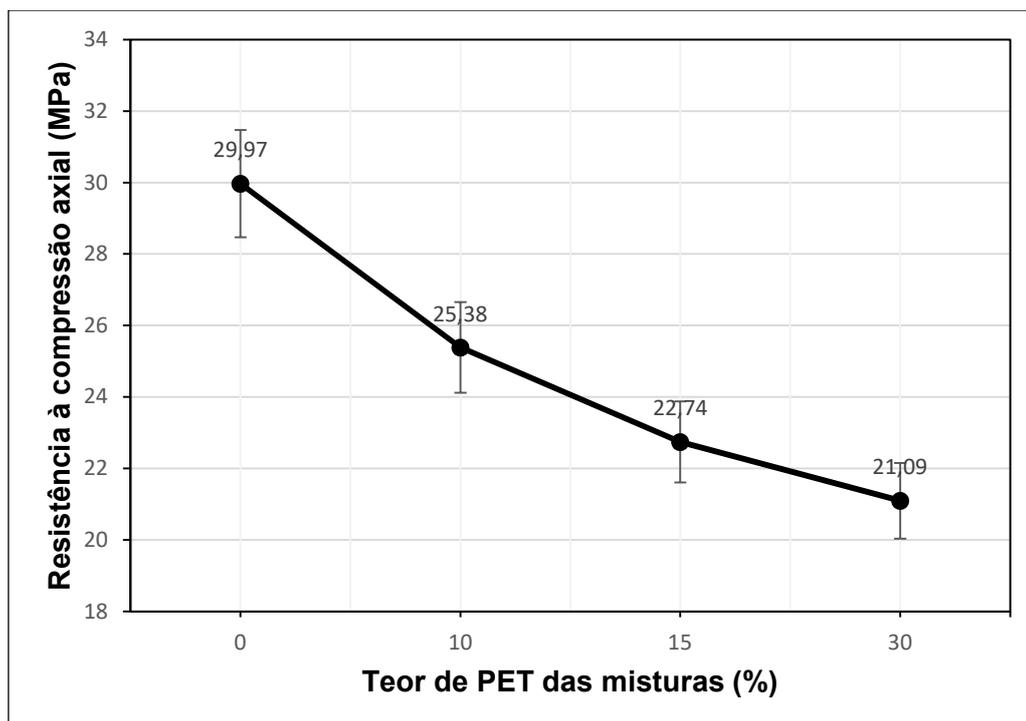


Fonte: Autoria própria

O Gráfico 7 mostra uma tendência de crescimento da resistência a compressão axial à medida que a idade dos concretos aumenta, como o esperado. A análise ANOVA (Tabela 6) mostra que, matematicamente, há diferenças significativas nos resultados, ou seja, a idade de ensaio influencia, significativamente, nos valores de resistência à compressão axial dos concretos.

O Gráfico 8 mostra os resultados da influência da variável – Teor de PET – na resistência à compressão axial a partir dos dados da ANOVA (Tabela 6).

Gráfico 8 – Resistência à compressão axial x Teor de PET

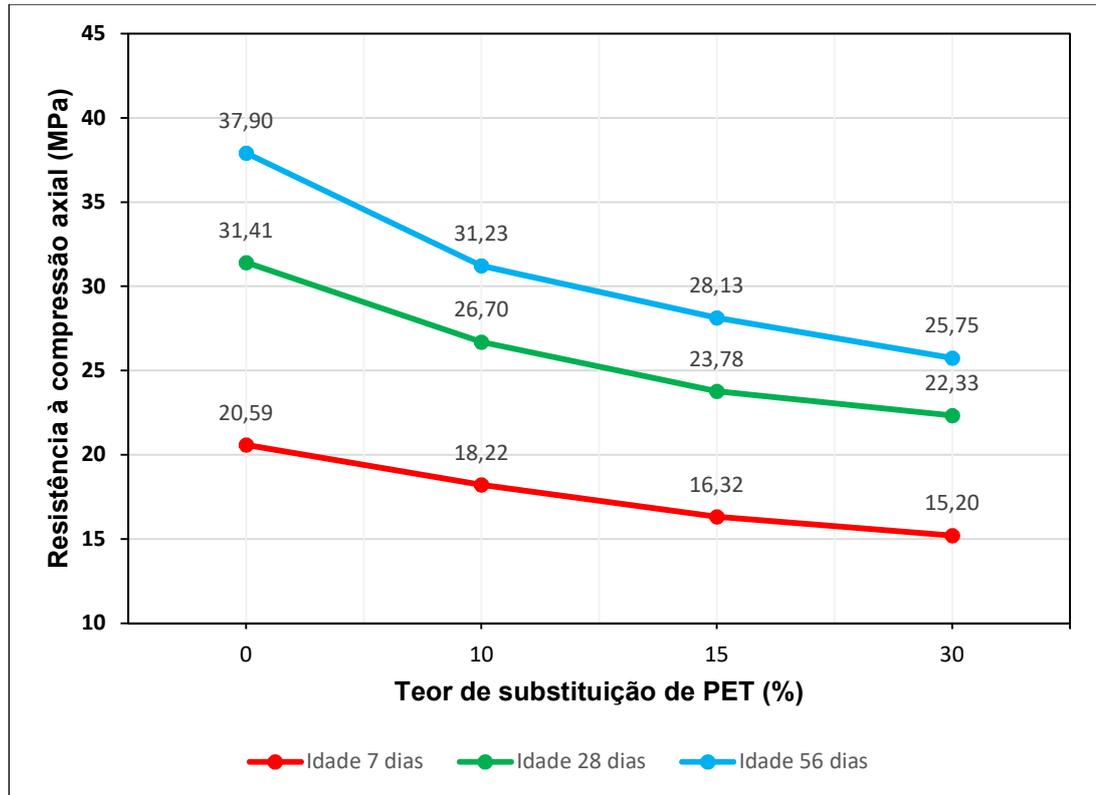


Fonte: Autoria própria

Como se observa no Gráfico 8, há uma tendência de diminuição da resistência à compressão axial dos concretos com o aumento do teor de PET. Alguns autores como Pietrobelli (2010) e Moura (2017) também observaram em suas pesquisas uma perda dessa propriedade, com o aumento do percentual de PET nos concretos, principalmente para teores superiores a 20%.

O Gráfico 9 apresenta o comportamento da resistência à compressão axial em relação a Idade * Teor de PET. Nele, é possível perceber que as 3 curvas apresentam um mesmo comportamento e que há um ganho de resistência à compressão axial com o passar da idade, sendo que esse comportamento é significativo como apresentou a ANOVA (Tabela 6).

Gráfico 9 – Resistência à compressão axial x fator Idade*Teor de PET



Fonte: Autoria própria

Após o teste ANOVA foi realizado o teste de Duncan para comparar e mostrar quais os pares de médias que diferem estatisticamente entre si (Tabela 7). A tabela contendo os valores originais está apresentada no Apêndice D.

Tabela 7 – Resultado significativos e não significativos do teste de Duncan

	Teor PET	Idade	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}	{11}	{12}
1	0	7	-	S	S	NS	S	S	S	S	S	S	NS	S
2	0	28	S	-	S	S	S	NS	S	S	S	S	S	S
3	0	56	S	S	-	S	S	S	S	S	S	S	S	S
4	10	7	NS	S	S	-	S	S	NS	S	S	S	S	S
5	10	28	S	S	S	S	-	S	S	S	NS	S	S	NS
6	10	56	S	NS	S	S	S	-	S	S	S	S	S	S
7	15	7	S	S	S	NS	S	S	-	S	S	NS	S	S
8	15	28	S	S	S	S	S	S	S	-	S	S	NS	NS
9	15	56	S	S	S	S	NS	S	S	S	-	S	S	NS
10	30	7	S	S	S	S	S	S	NS	S	S	-	S	S
11	30	28	NS	S	S	S	S	S	S	NS	S	S	-	S
12	30	56	S	S	S	S	NS	S	S	NS	NS	S	S	-

Fonte: Autoria própria

A Tabela 7 mostra a significância comparando todos os valores através do teste de Duncan. É possível se observar, pela Tabela 7, que não houve mudança significativa entre a resistência aos 7 dias, comparando um traço, de teor de substituição adjacente. O que se pode suspeitar é que seja por causa da cura do concreto estar no começo, apresentado valores de resistência à compressão axial próximos. Também não houve mudança significativa entre os traços 15PET e 30PET, nas mesmas idades, onde este, é um resultado inesperado, visto que os estudos de Pietrobelli (2010), para concreto, e Vaz (2016), para argamassas, apresentaram mudanças significativas entres estes dois teores.

Com exceção da comparação entre os resultados dos traços: REF, aos 7 dias e 30PET, aos 28 dias; REF, aos 28 dias e 10PET, aos 56 dias; 10PET, aos 28 dias e 15PET, aos 56 dias; 10PET, aos 28 dias e 30PET, aos 56 dias; 15PET, aos 28 dias e 30PET, aos 56 dias; e os resultados citados a cima, todas as outras comparações mostraram ser significativas.

4.2 Avaliação da dureza superficial

Para avaliação da dureza superficial foram ensaiadas duas placas de concreto por traço (dimensões 250 x 250 x 44mm), sendo deferidos 16 golpes por placa. Como a norma específica, após o ensaio foram determinadas as médias dos valores da dureza superficial dos concretos, descartado os valores que excederam 10% da média. As médias encontradas foram multiplicadas pelo fator de correção do aparelho, conforme recomendação da NBR 7584 (ABNT, 2012), em seguida, foram determinados os índices esclerométricos (IE) de cada traço em MPa.

Devido a uma das placas do traço 15PET apresentar menos que 5 resultados dentro do desvio de 10%, foi considerado apenas os valores médios de uma das placas. Conforme Pereira (2010), o ensaio de esclerometria de reflexão pode apresentar valores nem sempre precisos, já que seu resultado depende de diferentes fatores como: uniformidade da superfície ensaiada; condições de umidade; carbonatação superficial; rigidez do material; assim como, o local em que está apoiado.

Todos os valores dos IE são apresentados na Tabela 8, juntamente com os valores descartados (números tachados).

Tabela 8 – Índices esclerométricos

Traço	REF		10PET		15PET		30PET	
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2
Ponto n	IE		IE		IE		IE	
1	26	24	24	22	28	21	24	19
2	30	35	27	33	22	30	34	20
3	30	26	33	22	22	28	20	19
4	34	32	32	28	30	26	33	25
5	36	34	34	28	32	28	29	26
6	34	32	29	28	25	29	34	25
7	32	33	28	34	30	22	36	25
8	42	32	29	26	29	20	34	30
9	34	35	31	28	26	28	36	25
10	38	34	29	28	35	26	30	24
11	28	22	20	22	23	20	26	20
12	40	34	22	28	34	28	31	22
13	33	27	22	20	28	26	28	20
14	27	30	22	20	26	22	26	26
15	36	35	27	34	26	28	32	20
16	37	34	28	27	23	24	26	26
Média +10%	36,92	34,31	30,04	29,43	30,18	27,91	32,93	25,58
Média -10%	30,21	28,07	24,58	24,08	24,69	22,84	26,94	20,93
Méd. aritmética	34,14	32,78	28,14	27,63	27,56	25,50	30,00	24,33
K	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
IE	35,17	33,76	28,99	28,45	28,38	26,27	30,90	25,06
IE médio	34,46		28,72		28,38		27,98	

Fonte: Autoria própria

Utilizando a curva ajustada por Machado et al.(2009), seguindo a equação (2), para encontrar a resistência à compressão onde é apresentada na Tabela 9, na qual:

$$f_c = 0,026IE^{2,044} \quad \dots (2)$$

Tabela 9 – Resistência à compressão superficial e à compressão axial

Traços	Valores através do índice esclerométrico (IE)	Valores do ensaio de resistência à compressão axial aos 56 dias
REF	36,09 MPa	37,90 MPa
10PET	24,86 MPa	31,23 MPa
15PET	24,27 MPa	28,13 MPa
30PET	23,57 MPa	25,75 MPa

Fonte: Autoria própria

Foram obtidos os valores de 36,09 MPa para o traço REF, que se mostra próximo do valor encontrado no teste de resistência à compressão axial, na idade de controle de 56 dias. Para os traços 10PET, 15PET e 30PET foram encontrados os respectivos valores de 24,86 Mpa, 24,27 Mpa e 23,57 Mpa, no qual os traços de 10PET e 15PET mostraram estar um pouco distante dos valores de resistência à compressão axial a idade de controle de 56 dias.

Todos os valores obtidos se mostram menores que os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, onde pode ser causa de diversos fatores. Padoin (2017) também obteve valores menores, porém, próximos, nos ensaios de esclerometria de reflexão, comparado ao ensaio de resistência à compressão axial, utilizando a mesma correção de Moura et al. (2018), podendo ser algum erro na correção da curva.

4.3 Avaliação da condutividade térmica

A Tabela 9 apresenta os resultados de condutividade térmica dos concretos, realizados nas idades de controle de 28 e 56 dias, e os dados sobre a massa específica dos concretos no estado endurecido.

Tabela 10 – Condutividade térmica

Traço	Massa específica (kg/m ³)	Condutividade Térmica - 28 dias (W/(m.K))	Condutividade Térmica - 56 dias (W/(m.K))
REF	2359	0,5855	0,5858
10PET	2326	0,5513	0,5994
15PET	2321	0,5683	0,5883
30PET	2280	0,5623	0,5685

Fonte: Autoria própria

A NBR 15220 – Parte 2 (ABNT, 2008) apresenta uma tabela com as propriedades térmicas de alguns materiais com valores de condutividade térmica (λ) e calor específico c_p , levando em conta a densidade da massa aparente (ρ). A Tabela 11 mostra alguns desses valores presentes na norma.

Tabela 11 – Propriedades térmicas de materiais

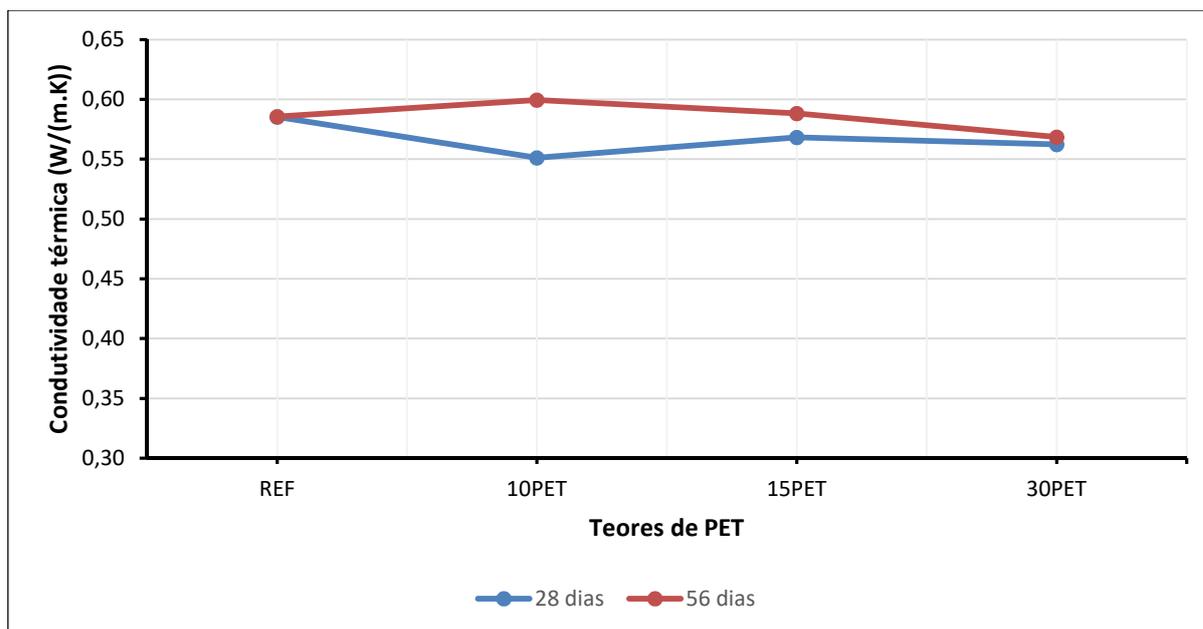
Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/(m.K))	c (kJ/(kg.K))
Concreto (com agregados de pedra)			
concreto normal	2200 - 2400	1,75	1,00
concreto cavernoso	1700 - 1800	1,40	1,00
Concreto com pozolana ou escória expandida com estrutura cavernosa (ρ dos inertes ~750 kg/m³)			
com finos	1400 - 1600	0,52	1,00
	1200 - 1400	0,44	1,00
sem finos	1000 - 1200	0,35	1,00

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15220 parte 2 (2008, p.9)

Comparando os valores dos resultados obtidos na Tabelas 10, com a Tabela 11, o traço referência destoa muito os valores, sendo que a norma apresenta valor de 1,75 para concretos normais e os valores encontrados ficam por volta de 0,58. Já os com substituição por areia de PET ficam com valores parecidos com concretos com pozolana. Apesar dos valores não se aproximarem dos valores da norma, os valores com substituição parcial por areia de PET apresentaram condutividade menor que o traço referência, mostrando possuir um melhor desempenho térmico.

O Gráfico 10 mostra o comportamento dos resultados (Tabela 10) do ensaio. Nota-se que há uma redução da condutividade térmica do traço referência para o traço 10PET e depois um pequeno aumento para o traço 15PET onde este valor praticamente se mantém no traço 30PET. Pode-se notar que, na idade de controle de 56 dias, houve um aumento de condutividade térmica para o traço 10PET, em relação ao traço REF, e uma redução da condutividade, conforme aumenta o teor de substituição, onde, a partir de 15% de substituição, apresenta uma tendência de valores menores que o traço referência.

Gráfico 10 – Condutividade térmica



Fonte: Autoria própria

Para identificar se houve uma mudança significativa, foi realizado uma análise de variância (ANOVA), onde os resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Análise de variância ANOVA da condutividade térmica

ANÁLISE ANOVA					
ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p
Intercept	5,311	1	5,3113	3960,89	0,000000
Idade	0,001	1	0,0014	1,04	0,338509
Teor PET	0,001	3	0,0003	0,21	0,887249
Idade*Teor PET	0,001	3	0,0005	0,34	0,798120
Error	0,011	8	0,0013		

Fonte: Autoria própria

Pela análise de variância (Tabela 12), fica claro que não houve uma mudança significativa ($p > 0.05$) para nenhum fator dependente estipulado.

Assim, como mostrado aos 56 dias, Moura et al. (2018) obteve condutividades térmicas iguais nos traços REF e 15PET (0,61) e um melhor desempenho térmico no traço 30PET (0,57) comparado ao traço 15PET. Porém, como mostrado na análise de variância (ANOVA), a melhoria de desempenho térmico não chega a ser significativa.

4.4 Ensaio de propagação de onda ultrassônica

A determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (Tabela 13), das amostras (placas com dimensões de 250 x 250 x 44mm), foram obtidas por transmissão direta com os transdutores nas faces opostas do material. Para cada traço foram realizados dois ensaios, por amostra, e duas amostras por traço, totalizando um total de 4 leituras por traço.

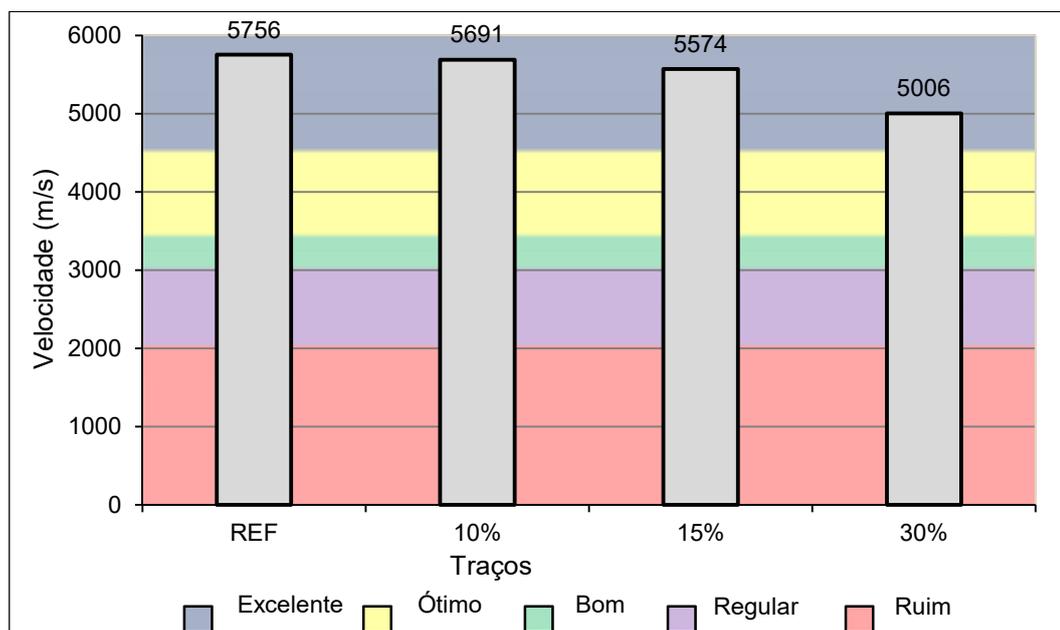
Tabela 13 – Velocidades de propagação da onda ultrassônica (m/s)

CP's	1° Ponto	2° Ponto	Média
REF A	5617	5434	5526
REF B	5882	6092	5987
10% A	6024	5813	5919
10% B	5494	5434	5464
15% A	5376	5617	5497
15% B	5555	5747	5651
30% A	4807	4761	4784
30% B	4901	5555	5228

Fonte: Autoria própria

Os valores médios obtidos das 4 leituras de velocidade são apresentados no Gráfico 11.

Gráfico 11 – Condição dos concretos em relação a sua velocidade de propagação de onda ultrassônica



Fonte: Autoria própria

O Gráfico 10 apresenta os valores para cada traço e as faixas que determinam a qualidade da resistência do concreto de acordo com NBR 8802 (ABNT, 2019). Como visto no gráfico há uma redução de velocidade de propagação da onda ultrassônica com o aumento do teor de PET, porém, os traços apresentaram velocidade acima de 5000 m/s, mostrando que, segundo Rincón et al. (1998), os concretos podem ser classificados como tendo compacidade excelente.

Fazendo uma correlação com o IE e a velocidade de ultrassom (VU) utilizando as equações (3), (4) e (5) do RILEM, Gasparik e Di Leo e Pascale assim como Mohamad et al. (2014) fizeram, pode-se chegar a um valor de resistência do concreto.

$$f_c = 9,27.10^{-11}.IE^{1,4}.VU^{2,6} \quad \dots(3)$$

$$f_c = 8,06.10^{-8}.IE^{1,246}.VU^{1,85} \quad \dots(4)$$

$$f_c = 1,2.10^{-9}.IE^{1,058}.VU^{2,446} \quad \dots(5)$$

Onde f_c é a resistência do cubo de concreto (MPa); o IE é o índice esclerométrico; VU é a velocidade de ultrassom em m/s.

Tabela 14 – Resistência através do IE e VU

	IE	VU	RILEM	Gasparik	Di Leo e Pascale
REF	34,46	5756 m/s	78,64 MPa	59,99 MPa	79,97 MPa
10PET	28,72	5691 m/s	59,16 MPa	46,81 MPa	64,14 MPa
15PET	28,38	5574 m/s	55,12 MPa	44,38 MPa	60,20 MPa
30PET	27,98	5006 m/s	40,86 MPa	35,74 MPa	45,59 MPa

A Tabela 14 apresenta os valores da resistência do concreto através das equações (3), (4) e (5), e como Mohamad et al. (2014), apresentaram valores diferentes dos teóricos.

4.5 Síntese dos resultados

A Tabela 15 apresenta a compilação dos resultados estudados neste trabalho, demonstrando se em cada em ensaio houve uma melhora, redução ou se teve mudança não significativa.

Tabela 15 – Síntese dos resultados

ENSAIOS	Mecânicos	Resistência à compressão axial	
		Esclerometria	
	Físicos	Condutividade Térmica	
		Velocidade de Ultrassom	
PROPRIEDADES		Massa específica	

Fonte: Autoria própria

Onde que:



– Apresenta melhora no desempenho;



– Apresenta mudança não significativa no desempenho;



– Apresenta um redução no desempenho;

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho avaliou o desempenho mecânico através da resistência a compressão axial e dureza superficial e avaliou o desempenho físico através da condutividade térmica e velocidade de propagar de onda ultrassônica através do concreto com substituição do agregado miúdo natural por agregado de PET.

Inicialmente foi observado uma redução da massa específica dos concretos com teores com substituição, o que já era esperado, devido à baixa densidade do PET.

Os concretos apresentaram perda da resistência à compressão axial, à medida que os teores de substituição foram aumentados nas misturas, o que já era esperado devido a outros trabalhos estudados, como o de Canellas (2005) e Pietrobelli (2010). Todos os traços obtiveram resultados acima de 25 MPa para a idade de controle de 56 dias, podendo ser classificados como concretos estruturais, segundo a NBR 8953 (ABNT, 1992).

Os valores de resistência à compressão obtidos através da conversão do índice esclerométrico pela curva de Machado (2009), mostram-se abaixo de 25 MPa para os traços com substituição de PET. Porém, isto pode ser devido ao ensaio avaliar apenas a resistência da superfície concreto e a alta variabilidade do ensaio de esclerometria comparado com o ensaio de resistência à compressão axial.

Como já observado, em outros trabalhos, com substituição de PET (MOURA, 2017), já era esperado uma melhora na condutividade térmica dos concretos, porém, essa melhora não foi significativa. Comparando os resultados com a NBR 15220 – 2 (ABNT, 2008) houve uma diferença muito grande no valor da norma para o traço REF, o que em si, requer que seja refeito os concretos, mantendo os materiais utilizados, para a validação dos resultados.

Em relação ao ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica, conclui-se que todas as amostras apresentaram velocidade acima de 5000 m/s, indicando um ótimo concreto com boa homogeneidade e sem apresentar imperfeições internas. Porém, devido redução de velocidade no traço com 30PET, torna-se interessante avaliar a velocidade de propagação de onda ultrassônica para traços com teores de substituição de PET superiores a 30%.

O trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas e físicas descritas anteriormente, a fim de indicar uma possível utilização de concretos com

teores de PET, visando a reciclagem do PET e a redução do consumo de agregado miúdo natural. A partir dos resultados obtidos, pode-se indicar os teores com até 30% para concretos estruturais e devido a melhora, mesmo que não significativa, da condutividade térmica, pode se utilizar em divisórias de concreto, visando um melhor conforto térmico do ambiente.

Assim como Mohamad et al. (2014) os valores obtidos pelas equações (3), (4) e (5) de RILEM, Gasparik e Di Leo e Pascale, os valores encontrados foram diferentes dos outros ensaio como resistência à compressão axial e a resistência a compressão superficial. Os valores encontrado por ele foram abaixo do esperado enquanto os valores encontrados neste estudo foram maiores. Esse fato conclui, o mesmo que Mohamad et al. (2014), que os modelos utilizados não são confiáveis para a previsão de resistência do concreto a partir da velocidade de ultrassom e o índice esclerométrico.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento do trabalho, e após as análises dos resultados, foram levantadas várias questões em que poderia obter resultados satisfatórios e significativos para o meio acadêmico. Desse modo, apresenta-se algumas sugestões de trabalhos futuros:

- O estudo de dosagem com maior gama de teores com substituição do agregado miúdo natural por agregado de PET, visando ter uma análise mais completa do comportamento do concreto.
- O estudo da condutividade térmica para teores maiores que 30%, a fim de verificar se há mudança significativa.
- O estudo do conforto acústico, visando os resultados de isolamento e absorção acústica, para verificar se é viável a implantação de divisórias de concreto com teores de PET.

REFERÊNCIAS

ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural**: Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais. 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA CIMENTO PORTLAND. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/>> Acesso: 20 nov. 2017

ABIHPEC; ABINAM; ABIPET; ABIR. **Censo da Reciclagem do PET no Brasil**. 10 ed. 2016. 12 p.

ABIPET – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. 2012. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/>> Acesso: 10 nov. 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 5739**: Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 7584**: Concreto Endurecido: Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 8802**: Concreto Endurecido: Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais e pó: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR NM 45**: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 248**: Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008.

BELLIS, M. **The History of Polyester. Polyester: Advancing the Research of Wallace Carothers**. (201?) Disponível em <https://www.thoughto.com/history-of-polyester-4072579>. Acesso em 25 out. 2017.

BUEST, G. T.; SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. Dosagem de finos com agregados miúdos e graúdos britados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 47., 2005, Recife. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, 2005. Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/ngsilva/links-2/noticias/ARTIGO%20IBRACON.pdf>>. Acesso em 20 nov.2017.

CANELLAS, S. S. **Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassas**. 2005, 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaios Não Destrutivos**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

FONTANA, T. B. **Ensaio não destrutivo para determinação da resistência à compressão sob tensão**. 2015. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

FORMIGONI, A. **Reciclagem de PET no Brasil**. 2006, 70 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Paulista, São Paulo, 2006.

GALLI, B.; MAGINA, C.; MENEZES, R.; PEREZ, P.; UENO, H. Uso de garrafas de Poli-tereftalato de Etileno – PET como insumo alternativo na construção de edificações residenciais. In: Seminário Nacional de Construções Sustentáveis, 1., 2012, Passo Fundo - RS. **Anais eletrônicos**. Passo Fundo: IMED, 2012. Disponível em: < <https://www.imed.edu.br/Comunicacao/Eventos/Hotsite/iv-sncs/anais-sncs---v1--n1--nov-2012>>. Acesso em: 16 nov. 2017.

GONÇALVES, L. S.; TOMMASELLI, M. A. G. Verificação da condução térmica de concretos produzidos com a incorporação de diferentes concentrações de garrafa PET. In: ENCONTRO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, ENEPE DA UFGD, 8., EPEX DA UEMS, 5., 2014, Dourados – MS. **Anais eletrônicos**. Dourados: UFGD e UEMS, 2014. Disponível em: <<http://eventos.ufgd.edu.br/enepex/anais/arquivos/466.pdf>>. Acesso em: 09 nov. 2017.

JARDIM, R. R. **Estudo da viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo por agregado miúdo reciclado de PET em concretos convencionais**. 2016, 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

JUNGES, B. M. B. **Estudo da distribuição espacial da dureza no concreto autoadensável**. 2016. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

LEITE, P. R. **Logística Reversa: Meio ambiente e competitividade**. 2 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

MACHADO M. D.; et al. Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos. **IBRACON**, Volume 2, 2009, p. 100-123.

MATOS, T. F. L. **Avaliação da viabilidade de reintegração de resíduos de PET pós-consumo ao meio produtivo**. 2009, 64 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MOHAMAD, G.; et al. Métodos combinados para a avaliação da resistência de concretos. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, V. 20, n, 01, p. 83-89, 2015.

MEDEIROS, A. **Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MOURA, N. B. **Estudo da viabilidade de substituição parcial do agregado miúdo natural por resíduo de PET na fabricação de concreto leve**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete. Alegrete, 2017.

MOURA, N. B.; et al. Estudo da viabilidade de utilização de resíduos de PET na fabricação de concretos leves. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO CBC2018, 60., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos**. Foz do Iguaçu: IBRACON, 2018. Disponível em <<http://ibracon.org.br/eventos/60cbc/artigos/>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

NÔUS; ABIPET. **Censo da Reciclagem do PET no Brasil**. 5 ed. 2009. 25 p.

PADOIN, D. G. **Estudo das propriedades mecânicas e físicas de um traço comercial de concreto autoadensável com e sem substituição de cinza de casca de arroz.** 2017, 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.

PEREIRA, C. M. C. **Caracterização do betão através de técnicas não destrutivas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

PRESSETTE, J. B.; PELISSER, F. **Efeito da borracha reciclada de pneus na condutividade térmica de paredes de concreto.** 2012, 15 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2013.

PIETROBELLI, E. N. **Estudo de viabilidade do PET reciclado em concreto sob aspecto de resistência a compressão.** 2010, 71 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Chapecó, 2010.

PRETTE, L. D. **Caracterização Físico-química de PET ramificado e de suas blendas com PET reciclado.** 2004. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

RINCÓN, O. T.; CARRUYO, C. A.; HELENE, P.; DÍAZ, I. **Manual de inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion em estruturas de hormigon armado.** DURAR: Red Temática XV. B Durabilidad de la Armadura – Programa Iberoamericano de Ciência y Tecnología para el desarrollo, 1998.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N. **Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida.** Matéria (Rio J.), Rio de Janeiro, v. 15, n. 1, 2010.

SENGER, S. C. T. **Determinação das propriedades térmicas de materiais de construção através do método do regime regular e sua aplicação na transferência de calor de paredes.** 2012. 119 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Departamento de Ciências Exatas e Engenharia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2012.

SOUSA, C. C.; ALVES, A. L.; ZANFOLIM, A. A.; GOTARDI, F. G. N. Verificação da condução térmica de concretos produzidos com a incorporação de diferentes concentrações de garrafa PET. In: ENCONTRO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, ENEPE DA UFGD, 8., EPEX DA UEMS, 5., 2014, Dourados – MS. **Anais eletrônicos.** Dourados: UFGD e UEMS, 2014. Disponível em: <<https://anaisonline.uems.br/index.php/enic/article/viewFile/2258/2180>>. Acesso em: 09 nov. 2017.

VAZ, C. E. **Avaliação de desempenho de argamassa modificada: com areia de PET.** 2016, 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

APÊNDICE A – Granulometria do agregado miúdo natural

Peneiras		A1 (g)	% R	% RA	A2 (g)	% R	% RA	% Rméd	% RAMéd	Modulo de Finura
(mm)	Nº									
9,50	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,75	Nº 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,36	Nº 8	5,10	1,02	1,02	4,90	0,98	0,98	1,00	1,00	1,00
1,18	Nº 16	18,60	3,72	4,74	18,40	3,68	4,66	3,70	4,70	5,70
0,60	Nº 30	54,60	10,92	15,66	55,20	11,04	15,70	10,98	15,68	21,38
0,30	Nº 50	321,50	64,30	79,96	319,50	63,90	79,60	64,10	79,78	101,16
0,15	Nº 100	92,80	18,56	98,52	94,80	18,96	98,56	18,76	98,54	199,70
Fundo		7,40	1,48	100,00	7,20	1,44	100,00	1,46	100,00	
Total		500,00	100		500,00	100		100		
								D máx (mm)	1,18	
								Módulo de Finura	2,00	

APÊNDICE B – Granulometria do agregado miúdo de PET

Peneiras		A1 (g)	% R	% RA	A2 (g)	% R	% RA	% Rméd	% RAMéd	Modulo de Finura
(mm)	N°									
9,50	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,75	N° 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,36	N° 8	10,60	2,12	2,12	16,60	3,32	3,32	2,72	2,72	2,72
1,18	N° 16	133,20	26,64	28,76	162,90	32,58	35,90	29,61	32,33	35,05
0,60	N° 30	150,50	30,10	58,86	168,90	33,78	69,68	31,94	64,27	99,32
0,30	N° 50	126,40	25,28	84,14	85,20	17,04	86,72	21,16	85,43	184,75
0,15	N° 100	49,10	9,82	93,96	40,40	8,08	94,80	8,95	94,38	279,13
Fundo		30,20	6,04	100,00	26,00	5,20	100,00	5,62	100,00	
Total		500,00	100,00	-	500,00	100,00	-	100,00	-	
D máx (mm)								4,75		
Módulo de Finura								2,79		

APÊNDICE C – Granulometria do agregado graúdo

Peneiras		% R	% RA
(mm)	N°		
25,00	-	0,00	0,00
19,00	-	0,88	0,88
12,50	-	58,81	59,70
9,50	-	34,04	93,73
6,30	-	5,52	99,26
4,75	4,00	0,51	99,77
2,36	8,00	0,15	99,92
1,18	16,00	0,00	99,92
0,60	30,00	0,01	99,93
0,30	50,00	0,05	99,98
0,15	100,00	0,01	99,99
Fundo		0,10	100
Total		100	-
D máx (mm)			4,75
Módulo de Finura			6,94
Massa específica (g/cm ³)			2,73
Massa unitária - método A (g/cm ³)			1,53
Massa unitária - método C (g/cm ³)			1,44

APÊNDICE D – Resultado dos valores do teste de Duncan

	Teor PET	Idade	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}	{11}	{12}
1	0	7		0,000027	0,000024	0,060761	0,000372	0,000030	0,003840	0,020731	0,000083	0,000875	0,155198	0,001214
2	0	28	0,000027		0,000259	0,000024	0,002296	0,874461	0,000023	0,000077	0,017638	0,000023	0,000037	0,000661
3	0	56	0,000024	0,000259		0,000023	0,000038	0,000193	0,000023	0,000029	0,000068	0,000016	0,000027	0,000032
4	10	7	0,060761	0,000024	0,000023		0,000046	0,000027	0,123795	0,000696	0,000031	0,026987	0,004901	0,000084
5	10	28	0,000372	0,002296	0,000038	0,000046		0,002581	0,000030	0,031300	0,236863	0,000027	0,003864	0,422131
6	10	56	0,000030	0,874461	0,000193	0,000027	0,002581		0,000024	0,000089	0,019107	0,000023	0,000040	0,000769
7	15	7	0,003840	0,000023	0,000023	0,123795	0,000030	0,000024		0,000089	0,000027	0,347666	0,000394	0,000035
8	15	28	0,020731	0,000077	0,000029	0,000696	0,031300	0,000089	0,000089		0,003990	0,000045	0,230351	0,111578
9	15	56	0,000083	0,017638	0,000068	0,000031	0,236863	0,019107	0,000027	0,003990		0,000024	0,000556	0,070840
10	30	7	0,000875	0,000023	0,000016	0,026987	0,000027	0,000023	0,347666	0,000045	0,000024		0,000117	0,000030
11	30	28	0,155198	0,000037	0,000027	0,004901	0,003864	0,000040	0,000394	0,230351	0,000556	0,000117		0,014471
12	30	56	0,001214	0,000661	0,000032	0,000084	0,422131	0,000769	0,000035	0,111578	0,070840	0,000030	0,014471	